

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ



УПРАВЛЕНИЕ И ВЫСОКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ

2023
№ 3 (63)



ISSN 2074-1707

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В. Н. ТАТИЩЕВА

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2023

№ 3 (63)

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
№ 3 (63)

Редакционная коллегия

И.М. Азмухамедов, доктор технических наук, профессор, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры «Информационная безопасность» Астраханского государственного университета имени 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 кафедр 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 имени 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 имени В. Н. Татищева

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

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

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

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

А.В. Рыбаков, кандидат физико-математических наук, директор «Физико-математического института» Астраханского государственного университета имени В. Н. Татищева; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики Астраханского государственного университета имени В. Н. Татищева

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science, University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS dept. and MBDS innovation lab (www.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. 3 (63)**

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. 3 (63)**

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-s-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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

**М. А. Кузнецов, Герра Нелсон Жоземар Адау,
П. Д. Кравченя, Сашума Онориу Лукаш Алберту**
Использование моделей геопространственных предпочтений для ресторанного бизнеса 9–19

М. В. Дагаева, А. С. Катасёв
Методы и алгоритмы редукции нечётких правил
в моделях оценки дискретного состояния объектов 20–27

Е. О. Зубова, А. Д. Пахалев, М. Н. Шамшин, А. Б. Погожева
Способ улучшения работы обнаружения пилотной линии
на основе технологий компьютерного зрения 28–37

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

В. Ю. Кузнецова, Т. М. Гелагаев, Б. Р. Досмухамедов
Методика формирования привычек с использованием мобильного приложения 38–44

И. М. Ажмухамедов, Д. Р. Мухамедова
Анализ методов машинного перевода для создания переводческой системы
с классического китайского языка вэньянь на другие языки 45–53

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

**Е. А. Кулешова, А. Л. Марухленко, М. О. Таныгин,
Е. А. Косилова, Е. Д. Лаврова**
Реализация системы обнаружения вторжений с использованием нейронной сети 54–63

Джук Филипп Чике Окороджи
Архитектура программной системы для мониторинга,
оценки и помощи пациентам с болезнью Паркинсона 64–71

В. В. Гилка
Тестирование эффективности мобильного приложения HelpMeTracker
в мониторинге фиксации отклонений показателей уровня кислорода в крови человека 72–80

**Д. А. Сасов, А. В. Зубков, Н. А. Дорофеев,
Ю. А. Орлова, М. Ю. Фролов**
Классификация рака молочной железы по гистологическим микрофотографиям
с помощью нейронных сетей 81–89

Р. Ю. Демина, А. Н. Марьенков, В. А. Корякова
Нюансы программной реализации методики комплексной оценки
уровня безопасности прикаспийских регионов 90–97

**В. А. Литвиненко, С. В. Степанов,
Д. Р. Черкашин, А. Р. Донская**
Программный комплекс когнитивных тренировок 98–105

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

И. В. Аникин, И. И. Исмагилов

Стеганографический метод сокрытия информации в изображениях
на основе параметризованных дискретных ортогональных преобразований 106–114

**В. И. Петренко, Ф. Б. Тебугева, И. В. Стручков,
А. С. Павлов, С. С. Рябцев**

Метод доверенного взаимодействия агентов
в децентрализованной киберфизической среде
на основе технологии распределенного реестра 115–125

Р. Ю. Демина, Т. Г. Гурская, Д. Э. Шукралиева

Навязывание заведомо ложной информации вредоносными парсерами 126–132

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Непрокин, А. В. Горбунов, П. А. Палатов

Технические средства визуализации нистагма 133–138

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 139

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS

- M. A. Kuznetsov, Guerra Nelson Josemar Adao,
P. D. Kravchenya, Sachuma Honorio Lucas Alberto**
Using geospatial preferences models for the restaurant business..... 9–19

- M. V. Dagaeva, A. S. Katasev**
Methods and algorithms of fuzzy rules reduction
in models for objects discrete state assessing..... 20–27

- E. O. Zubova, A. D. Pakhalev, M. N. Shamshin, A. B. Pogozeva**
Method for improving pilot line detection performance
based on computer vision technologies..... 28–37

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- V. Yu. Kuznetsova, T. M. Gelagaev, B. R. Dosmukhamedov**
Habits formation methodology using a mobile app 38–44

- I. M. Azhmukhamedov, D. R. Mukhamedova**
Analysis of machine translation methods to develop a translation system
from wenyang classic Chinese to other languages 45–53

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

- E. A. Kuleshova, A. L. Marukhlenko, M. O. Tanygin,
E. A. Kosilova, E. D. Lavrova**
Implementation of intrusion detection system using a neural network 54–63

- Dyuk Filipp Chike Okorodzhi**
Architecture of the software system for monitoring, assessment,
and assistance to patients with Parkinson's disease..... 64–71

- V. V. Gilka**
Testing the efficiency of the mobile application HelpMeTracker
in monitoring deviations in human blood oxygen levels..... 72–80

- D. A. Sasov, A. V. Zubkov, N. A. Dorofeev,
J. A. Orlova, M. Yu. Frolov**
Breast cancer histopathology classification using neural networks 81–89

- R. Yu. Demina, A. N. Marenkov, V. A. Koryakova**
Nuances of the program implementation of the methodology
for comprehensive assessment of the level of security of the Caspian regions..... 90–97

- V. A. Litvinenko, S. V. Stepanov, D. R. Cherkashin, A. R. Donskaya**
Cognitive training software package..... 98–105

METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION PROTECTION, INFORMATION SECURITY

I. V. Anikin, I. I. Ismagilov

Steganography method for digital images

based on parametric discrete orthogonal transforms 106–114

**V. I. Petrenko, F. B. Tebueva, I. V. Struchkov,
A. S. Pavlov, S. S. Ryabtsev**

Method for trusted interaction of agents in decentralized cyber-physical environment

based on distributed ledger technology 115–125

R. Yu. Demina, T. G. Gurskaya, D. E. Shukralieva

Legal and hardware-software measures to protect web resources from malicious parsers 126–132

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

DEVICES, SYSTEMS AND MEDICAL PRODUCTS

A. V. Neprokin, A. V. Gorbunov, P. A. Palatov

Nystagmus visualization technology 133–138

RULES FOR THE AUTHORS 139

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.832.2:004.023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ДЛЯ РЕСТОРАННОГО БИЗНЕСА

Кузнецов Михаил Андреевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

Герра Нелсон Жоземар Адау, Би Инжиниринг ИКТ, 1050-218, Португалия, г. Лиссабон, ул. Соуза Мартинс, 10,

магистр информатики и вычислительной техники, IT-консультант, ORCID: 0009-0006-4639-5513, e-mail: nelsonguerrajr@gmail.com

Кравченко Павел Дмитриевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-1934-5792, e-mail: kpd_@mail.ru

Сахума Онориу Лукаш Алберту, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28,

магистрант, ORCID: 0009-0004-2131-0849, e-mail: honorio.hj50@gmail.com

В статье рассматриваются математические модели, используемые для выбора оптимального места расположения ресторанов и точек общественного питания в городе с учётом нескольких факторов, влияющих на конкурентоспособность заведения. Описанные в статье модели предполагают сбор данных об окружающем пространстве рядом с анализируемыми координатами через открытые публичные геоинформационные сервисы и социальные сети. Информация для анализа извлекается из открытых геоинформационных систем и социальных сетей. Получение информации происходит посредством запросов к API популярных сервисов, таких как Yelp и Zomato. Мера привлекательности геолокации строится на основе информации о расположенных в окружающем пространстве конкурентах. Для анализа влияния конкурентов рассматривается применение моделей центральной точки, предпочтений Рейли, методов Бэтти, Наканиши – Купера, Фотерингема. Предлагается модель многокритериального принятия решения на основе оценок посетителей, взятых из социальных сетей. Приводится метод построения зон доминирующего влияния конкурентов с использованием полигонов Тиссена.

Ключевые слова: СППР, ГИС, тепловая карта, кривые безразличия, зона доминирующего влияния, ЛПП

USING GEOSPATIAL PREFERENCES MODELS FOR THE RESTAURANT BUSINESS

Kuznetsov Mikhail A., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

Guerra Nelson Josemar Adao, Bee Engineering ICT, 10 Souza Martins St., Lisbon, 1050-218, Portugal, Master of Informatics and Computer Engineering, IT consultant, ORCID: 0009-0006-4639-5513, e-mail: nelsonguerrajr@gmail.com

Kravchenya Pavel D., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics & Mathematics), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-1934-5792, e-mail: kpd_@mail.ru

Sachuma Honorio Lucas Alberto, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

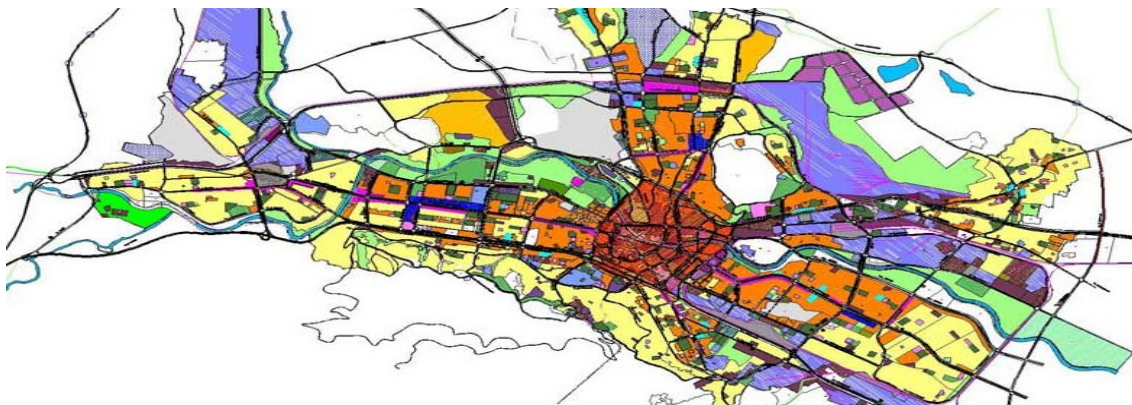
master's student, ORCID: 0009-0004-2131-0849, e-mail: honorio.hj50@gmail.com

The article discusses the mathematical models used to select the optimal location of restaurants and catering outlets in the city, taking into account several factors that affect the competitiveness of the institution. The models described in the article involve the collection of data about the surrounding space near the analyzed coordinates through open public geoinformation services and social networks. Information for analysis is extracted from open geographic information systems and social networks. Information is obtained through requests to the API of popular services such as Yelp and Zomato. The geolocation attractiveness measure is based on information about competitors located in the

surrounding area. To analyze the influence of competitors, the application of the central place theory, Reilly's preferences, the Batty, Nakanishi-Cooper, Fotheringham methods are considered. A model of multi-criteria decision-making based on visitor ratings taken from social networks is proposed. A method is given for defining zones of competitors dominant influence using the construction of Thyssen polygons.

Keywords: DSS, GIS, heatmap, dominant influence zone, indifference curves, decision maker

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

При запуске ресторанного бизнеса необходимо учитывать помимо экономических показателей проекта также и особенности инфраструктуры города, в котором открывается предприятие. Модели геопространственного предпочтения появились в XIX веке и активно развиваются на практике начиная с 60-х годов прошлого века [8]. Первоначально они ориентировались на задачи размещения крупных торговых центров. Из-за особенностей оценки влияния крупных торговых центров на потребителя в качестве их привлекательности используется величина торговой площади. Чем выше этот параметр, тем большее число арендаторов может разместиться в нём и тем более привлекательным становится данный торговый комплекс в рассматриваемой модели. Для ресторанного бизнеса такой показатель использовать невозможно. Хотя площади клиентских залов ресторана, а также площадь кухни имеют значение, но оценка привлекательности ресторана для потенциальных клиентов больше опирается на получение удовольствия от посещения ресторана. Это вкусовые ощущения от предлагаемых блюд, качество обслуживания персоналом, а также это может быть эстетическое наслаждение, связанное с оформлением клиентского зала, музыкального сопровождения. То есть привлекательность ресторана для потребителя не задаётся только лишь геометрическими параметрами помещения. Скорее, размер ресторана – это технологический вспомогательный параметр, влияющий на возможность обслуживать определенное количество посетителей, а также определяющий расходы на своё содержание. Разные рестораны с одинаковой площадью могут иметь различную привлекательность для посетителей. Важным также является ориентирование бизнеса на определённые потребительские сегменты.

СЕГМЕНТАЦИЯ РЕСТОРАННОГО БИЗНЕСА

Для учёта особенностей ресторанного бизнеса рассмотрим сегментацию точек общественного питания. Можно выделить два существенно отличающихся специфических класса. Это класс элитных дорогих ресторанов, направленный на уникальные предложения своим клиентам, и класс фастфуд, предполагающий быстрое и недорогое утоление чувства голода в местах с большим количеством туристов, студентов, заводских рабочих и офисных служащих. Если первый тип ресторана выполняет обслуживание небольшого числа посетителей с высокой стоимостью кассового чека, то второй предназначен для привлечения большого количества посетителей с гораздо меньшей стоимостью обслуживания. Модель учёта привлекательности фастфудов (ресторанов быстрого питания) ближе к пространственным моделям, привлекательность которых основывается на торговых площадях. Действительно, для фастфудов большое влияние имеют площади ресторанных залов, так как больший размер зала предполагает возможность обслужить большее число клиентов. Ведь именно массовость для фастфудов является ключом к успешности, так как цена кассового чека минимизирована. Различия в меню и особенностях обслуживания для фастфудов минимальны.

Еще одним особенным видом ресторана можно выделить классический семейный ресторан, предназначенный для поддержки сложившихся традиций питания. Он занимает промежуточное место, так как обладает более высоким средним чеком, чем фастфуд. Также он требует большого внимания к соблюдению традиций приема пищи и созданию комфортной для отдыха обстановки. Этим

они приближаются к элитным ресторанам. Часто такими ресторанами являются рестораны с национальным меню. При измерении привлекательности ресторана недостаточно использовать только площади клиентского зала и кухни. Важна оценка дополнительных показателей. Чем сильнее ресторан отличается от сегмента фастфуда, тем более важными становятся дополнительные параметры оценки. Для семейных и особенно элитных ресторанов привлекательность определяется в большей степени эстетическими и гастрономическими факторами. Для увеличения конкурентоспособности таким ресторанам необходимо стать в чём-то уникальными и фактически выделиться в отдельный подкласс.

Для моделей ресторанного бизнеса, направленных не только на удовлетворение голода (т. е. не просто вкусно и экономно накормить клиента), оценки гастрономической и эстетической привлекательности становятся более тонкими и сложно формализуемыми, подверженными сиюминутному вкусу и моде. Таким образом, совместно могут существовать рестораны, ориентированные на разную национальную кухню или предлагающие отличающиеся вечерние музыкальные выступления. Для элитных ресторанов пространственная привлекательность может иметь вообще второстепенное значение. Потенциальным клиентам таких ресторанов расстояние до него не столь важно. Чтобы получить уникальное эстетическое и гастрономическое наслаждение, они готовы мириться с более дальней поездкой. Для таких заведений нужно уделять большее внимание присутствию рядом подъездов для автотранспорта и мест для парковки. Более респектабельные клиенты имеют большую дистанцию поездок для осуществления своих трат [2].

УЧЁТ КОНКУРЕНЦИИ

При открытии ресторанного бизнеса нужно учитывать пространственную привлекательность не только ближайших по классу конкурентов, но и межсегментную конкуренцию. Механизм анализа межсегментного влияния наиболее сложен, так как для его учета нужно рассматривать психологические и социальные факторы, которые сложно формализовать, а также выполнить их оценку. Для такого вида учета требуется проведение дорогостоящего социально-экономического исследования [4].

Для ресторанов одного сегмента косвенно оценить их гастрономическую и эстетическую привлекательность можно по мнению посетителей, выражаемому в социальных сетях и электронных путеводителях по ресторанам. Открытые API таких сервисов позволяют получить усредненное мнение критиков. Выраженное в сетях мнение влияет также на формирование предпочтений у читателей отзывов о ресторанах. Таким образом, планируя собственную привлекательность с помощью экспертных оценок, возможно сравнивать собственное меню с меню конкурентов, а также оценивать закладываемую эстетику в собственный зал для клиентов опять же в сравнении с конкурентами.

Учёт пространственного предпочтения потенциальных клиентов ресторана строится на принципе понижения привлекательности ресторана с увеличением расстояния до него. Этот принцип такой же, как и в геопространственных моделях привлекательности торговых центров. Посетитель предпочтет более близкий ресторан, при прочих равных условиях. Рассмотрим существующие модели геопространственного выбора для торговых точек и проанализируем возможности их применения в области ресторанного бизнеса.

КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПРИОРИТЕТНОСТИ ГЕОЛОКАЦИЙ

При выборе оптимального места размещения торговых точек используются несколько различающихся подходов к определению эффективности геолокации. В работах [4, 8] приведены классификации методов оценки эффективности размещения торговых предприятий. В данной статье приведём чуть более простую классификацию, актуальную для ресторанного бизнеса. Существующие методы можно разделить на три большие группы: экономико-статистические, географические и вероятностные.

Наиболее теоретически обоснованы экономические методы определения эффективной геолокации для ведения торгового бизнеса. Они базируются на прогнозировании дохода по информации об успешности рядом расположенного бизнеса. При этом учитываются показатели выручки и объема сделок от вблизи расположенных заправочных станций, супермаркетов и прямых конкурентов. Такой подход анализирует платежеспособность потенциальных клиентов и объем возможных сделок. Однако методы требуют статистическую численную информацию о проведенных торговых сделках в разных районах города. Полной, объективной и достоверной данная информация может являться только в случае анализа показателей продаж собственной торговой сети. В этом случае анализ баланса торговых предприятий позволит сделать выводы об успешности или проблемности отдельных филиалов и на основе таких данных выполнить перераспределение ресурсов для максимизации прибыли. Возможно использовать математические методы двумерной интерполяции и экстраполяции финансовых показателей на карте города [3]. Экономико-статистические методы геопространственного выбора адекватно работают и для ресторанов, так как базируются на объективной информации о совершенных сделках. Они учитывают платежную активность потенциальных клиентов в зависимости от районов города.

В случае открытия нового торгового заведения доступ к статистическим данным о сделках существенно ограничен или требует высоких вложений на исследование покупательского потенциала

в разных частях города. Использование консалтинговых услуг для решения подобных задач имеет доверительный характер. Выбор места размещения торговой точки в этом случае базируется на вере лица, принимающего решение (ЛПР), в корректность, компетентность, адекватность и полноту сбора данных сторонними коммерческими предприятиями. Задача оценки эффективности геолокации ресторанного бизнеса сложно формализуется и к тому же нетривиальна, так как имеет множество субъективных факторов. Экономико-статистические методы можно назвать количественными. Они основываются на реальных экономических показателях, если, конечно, доступ к ним обеспечен.

Альтернативные подходы базируются на исследовании потенциальной возможности совершения покупок в определенных районах города без учёта статистики по совершённым сделкам. Принцип располагать бизнес в местах с высоким людским трафиком, а также в районах компактного проживания людей является аксиомой розничной торговли. Задача сводится к оцифровке изначально качественных параметров и получению аналитических формул для расчётов. На их основе делается заключение об эффективности размещения ресторанного бизнеса. Такие подходы выполняют оценку потенциального спроса на основе показателей плотности проживания, трафика рядом расположенных магистралей общественного транспорта, учёта привлекательности места с точки зрения отдыха и туризма. Также учитывается размещение торговых точек конкурентов [5, 7]. Модели на основе описанных подходов называются пространственными моделями. Их основное преимущество состоит в том, что они могут выполнять вычисление потенциала географического места на основе публичных данных, доступных из распространённых геоинформационных систем. Ещё одно важное преимущество пространственных моделей – это возможность учёта суперпозиций влияния конкурентов на спрос в исследуемой геолокации. Это может быть как конкуренция, так и агломерация [6].

Геопространственные модели предпочтений можно разделить на географические (построение на карте границ для зон доминирования) и вероятностные (построение на карте тепловых карт предпочтительности) [8]. Фактически границы в географических методах представляют собой обозначенные на картах кривые безразличия (в частном случае полигоны безразличия). Любая точка на границе зон влияния обладает равновесным воздействием от расположенных рядом конкурентов. В классических географических моделях используется плоская двумерная поверхность, на которой располагаются исследуемые объекты. Расстояния между объектами определяются как прямые отрезки и не учитывают карты дорог.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Исторически одним из первых, используемых на практике геопространственных моделей была модель центральной точки [4, 8]. Она использует понятие размера объекта. Первоначально такая модель обосновывала географическое расположение населенных пунктов (рис. 1). Поэтому в качестве размера объектов использовалось понятие населенности. Для задач определения привлекательности месторасположения торговой точки используется аналогичный параметр – посещаемость магазинов. В простейшем случае (например, для супермаркетов) данный параметр считается прямо пропорциональным торговым площадям. Границы влияния конкурентов строятся как линии, разделяющие двумерное пространство на соты. При этом образуется несколько уровней влияния. В этой модели напрашивается следующая аналогия. Торговые точки воздействуют на окружающее пространство подобно влиянию вышек сотовой связи на потенциальных абонентов. Более мощная вышка охватывает большую площадь, но делит пространство с другими вышками сотовой связи. Математически задача сводится к определению зоны покрытия и вычислению, соответственно, количества потенциальных клиентов в покрываемой зоне.



Рисунок 1 – Модель центральной точки

Модель центральной точки позволяет определить количество потенциальных клиентов с учётом наличия рядом расположенных конкурирующих объектов. При этом используются следующие допущения: отсутствуют ограничения на пути передвижения между исследуемыми точками, открытие новых торговых точек приводит к эволюционному перераспределению интереса потенциальных потребителей на основе близости расположенных конкурентов.

В реальности пути передвижения до торговой точки определяются картой дорог. Если сеть дорог имеет существенные отклонения от возможности прямых перемещений до конкурирующих торговых точек, то требуется учитывать структуру дорожной сети. Необходимо анализировать расстояние между конкурирующими предприятиями по доступным кратчайшим путям. Появление препятствий для прямых перемещений в пространстве между анализируемыми конкурентами требует учитывать их и потому искажает карту зон предпочтения [5].

Ещё один вариант определения границ влияния торговых точек на путях, расположенных между конкурентами, позволяет выполнить одномерная модель предпочтений Рейли [4]. Она используется для пространственного анализа предпочтений потребителя в розничной торговле. Модель Рейли строится на определении точки безразличия по аналитической формуле (1):

$$D_A = \frac{D_{AB}}{1 + \sqrt{\frac{P_B}{P_A}}}, \quad (1)$$

где D_A – расстояние от объекта А до точки безразличия;

D_{AB} – расстояние между объектами А и В;

P_A – привлекательность объекта А;

P_B – привлекательность объекта В.

Точка безразличия определяется как граница зон влияния объектов на исследуемых дорожных маршрутах. Для розничной торговли в качестве привлекательности используется торговая площадь (рис. 2). Модель базируется на допущении, что влиянием других расположенных на маршруте объектов за пределами исследуемого отрезка пути можно пренебречь. Одномерность модели Рейли не позволяет использовать её в чистом виде на двумерном пространстве. Однако при анализе расположения торговых объектов на междугородних магистралях, а также внутри протяженных городов, данная модель вполне жизнеспособна. Яркий пример такого города – это г. Волгоград. Его внутригородские магистрали представляют собой три практически параллельных продольных магистрали вдоль города, который располагается на берегу реки Волги. Деление влияния крупных торговых точек здесь адекватно определяется законом Рейли. Существуют и другие подобные города, инфраструктура которых строится вдоль рек, побережья моря, т. е. зажата между естественными границами города – горами, берегом моря, реки, озера. Для ресторанного бизнеса модель Рейли можно использовать, учитывая в качестве привлекательности специфический параметр, отличающийся от площади помещения. Оценки ресторанов, выставленные в социальных сетях, хорошо подходят в качестве меры привлекательности ресторана.



Рисунок 2 – Вычисление точки безразличия между торговыми объектами

Для учёта влияния более двух конкурирующих объектов при построении границ зон преобладающего воздействия в условиях отсутствия ограничений на перемещение потребителя в двумерном пространстве используются принципы построения полигонов Тиссена [8]. В основе построения полигонов Тиссена лежит предположение, что потенциальный клиент ресторана выберет ближайшее заведение, чтобы сэкономить время и средства на перемещение к нему. Полигоны Тиссена обладают уникальным свойством, суть которого заключается в том, что каждый полигон связан только с одной ключевой точкой на карте. Любое место в пределах этого полигона находится ближе к ключевой точке, чем к любым другим точкам. То есть зоны, образуемые полигонами Тиссена, являются зонами влияния расположенного внутри неё объекта с учётом кратчайшего к нему пути.

Принцип вычисления расстояний до границ зоны доминирующего влияния объектов с учётом привлекательности (веса) ключевых точек лежит в основе вычислений метода Бэтти [4]. Этот метод фактически объединяет подходы, используемые в методе Рейли и принципах построения полигонов

Тиссена. Для вычисления точки безразличия по любым путям между объектами А и В необходимо воспользоваться уравнением (2):

$$\frac{w_A^\beta}{D_{AP}^\alpha} = \frac{w_B^\delta}{D_{BP}^\alpha}, \quad (2)$$

где D_{AP} – расстояние от объекта А до точки безразличия;

D_{BP} – расстояние от объекта В до точки безразличия;

w_A – вес объекта А;

w_B – вес объекта В;

α – коэффициент чувствительности к расстоянию;

β – коэффициент воспринимаемой привлекательности объекта А;

δ – коэффициент воспринимаемой привлекательности объекта В.

Метод Бэтти довольно трудоемок с точки зрения определения коэффициентов. Они вычисляются методом регрессии на основании опросов клиентов из исследуемого района. При незначительных отличиях между коэффициентами ими можно пренебречь и использовать линейную зависимость.

Рассмотрим практический пример – проанализируем деление на доминирующие зоны для ресторанов Лиссабона. В качестве критериев привлекательности конкурирующих ресторанов использовались оценки посетителей, извлекаемые с помощью API следующих сервисов: Zomato и Yelp. Результат использования построения полигонов Тиссена с ограничением максимального расстояния в зоне влияния приведен на рисунке 3. Зоны расцвечены на основании оценок ресторанам, выставленных в сервисе Yelp. Более тёплый цвет зоны соответствует ресторанам с высокими средними оценками от посетителей. Графическое отображение зон доминирующего влияния конкурентов позволяет ЛПР наглядно проанализировать перспективные локации для открытия ресторанного бизнеса.

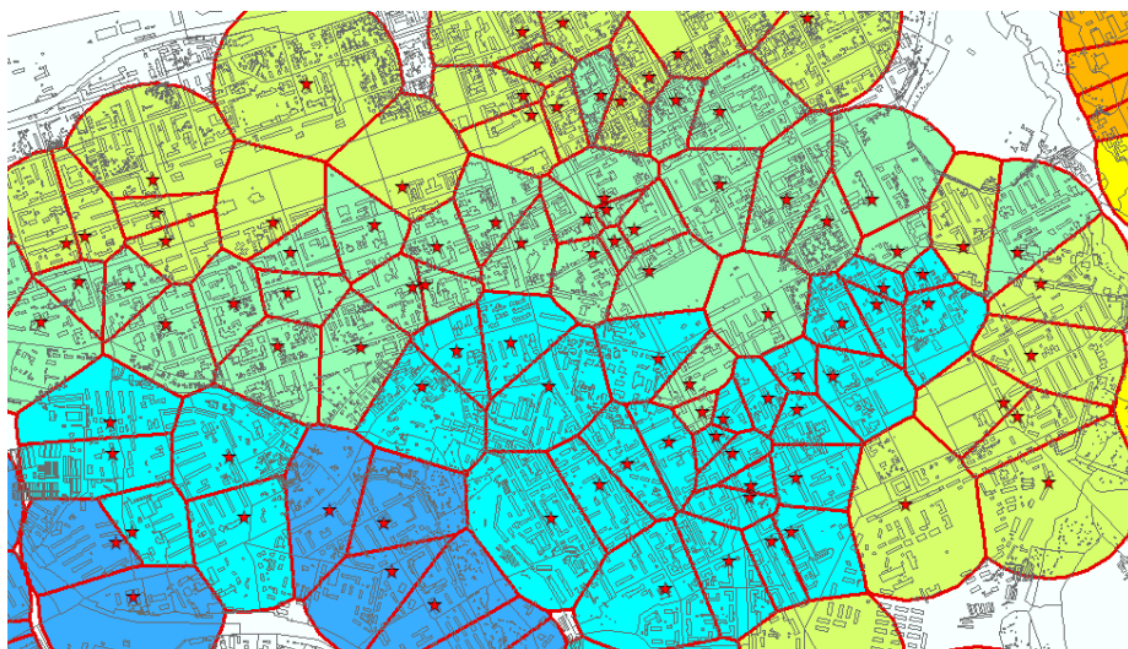


Рисунок 3 – Границы зон влияния

Показанный на практике подход на основе географических методов предполагает построение границ между зонами влияния объектов. Однако в реальном мире нахождение потенциального потребителя в разных частях одной и той же выделенной зоны неравнозначно. Чем ближе расположен потребитель к искусственно вычисленной границе, тем меньше влияет на него ближайший объект и начинают оказывать сильное влияние другие близлежащие заведения. Предпочтения потребителя изменяются плавно при перемещении от одной геолокации к другой. Деление зон влияния ресторанов на основе построения полигонов Тиссена или метода Бэтти невозможно применить на практике, если количество конкурентов большое, а расстояние между ними мало. При высокой пространственной конкуренции происходит взаимопроникновение влияния ресторанов на соседние территории, и существенное количество клиентов привлекается из «чужих» зон. Географические методы пренебрегают учётом такого заимствования.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ

Способы пространственного анализа предпочтений потребителя, основанного на вероятностных моделях, представляют следующую группу методов учёта приоритетности геолокации. Они базируются на вычислении вероятности предпочтения анализируемого объекта потребителем, находящимся в определенной географической точке. Данные методы основаны на аксиоме потребительского выбора Льюиса. Она заключается в том, что потребитель при выборе торгового объекта учитывает субъективные оценки привлекательности конкурентов (альтернативных предложений). Вероятность выбора потребителем одной из альтернативных торговых площадок есть отношение полезности конкретного объекта к сумме полезностей всех доступных конкурентов. Формально аксиома Льюиса может быть представлена выражением (3):

$$P_{ij} = \frac{U_{ij}}{\sum_{k=1}^M U_{ik}}, \quad (3)$$

где P_{ij} – вероятность того, что посетитель из локации i придёт в ресторан j ;

U_{ij} – оценка привлекательности ресторана j для посетителя из локации i ;

$\sum_{k=1}^M U_{ik}$ – сумма значений оценок привлекательности всех доступных ресторанов для посетителя в локации i ;

M – множество ресторанов в исследовании.

Используя закон Рейли совместно с законом Льюиса, можно сформулировать вероятностное распределение возможности посещения определённого объекта в зависимости от географического расположения потенциального клиента. При этом закон Рейли учитывает уменьшение привлекательности торговой точки в зависимости от её удаления, а закон Льюиса позволяет выполнить вычисление суперпозиции влияния конкурирующих объектов. Таким образом, в 1963 году Хафф предложил следующую аналитическую модель:

$$P_{ij} = \frac{U_{ij}}{\sum_{k=1}^M U_{ik}} = \frac{S_j^\alpha D_{ij}^\beta}{\sum_{k=1}^M (S_k^\alpha D_{ik}^\beta)}, \quad (4)$$

где P_{ij} – вероятность того, что потребитель в локации i посетит торговую точку j ;

M – множество конкурирующих торговых заведений;

U_{ij} – полезность торгового объекта j для локации i ;

S_j – размер (площадь) торговой точки j ;

D_{ij} – расстояние между потребителем в локации i и торговой точкой j ;

α, β – параметры чувствительности; в соответствии с законом Рейли, $\alpha = 1$ и $\beta = -2$.

Отображение вероятности посещения анализируемого ресторана нагляднее показывать на схеме города в виде тепловой карты.

Для анализа меры потребительской привлекательности конкурирующих торговых площадок используется одномерный параметр – приоритетность (или же предпочтительность). Считается, что этот параметр аналогичен массе тела в гравитационной задаче. Чем массивнее тело и чем ближе оно расположено к анализируемой точке, тем сильнее его притяжение. Потому пространственная модель Хаффа, в которой учитывается привлекательность объектов, называются ещё гравитационной моделью [9].

Ресторанный бизнес имеет некоторые особенности. Измерять привлекательность ресторана только площадью торгового зала, как это делается для маркетов, нельзя. Кроме того, не все рестораны равнозначны с точки зрения потребителя. Некоторые рестораны используются только лишь для удовлетворения чувства голода, некоторые для проведения совместного романтического и/или семейного отдыха, корпоративов и встреч с друзьями.

Чтобы рассмотреть особенности учета привлекательности ресторанов, необходимо брать во внимание несколько критериев и структурировать их в зависимости от сегментации. Для этого для торговых объектов в вероятностных моделях предпочтений клиентов используется многокритериальные модели Наканиши – Купера, МакФаддена, Фотерингема и Раста – Донту [4, 8, 10]. Эти модели базируются на аксиоме Льюиса, как и модель Хаффа, но для получения цифровых значений предпочтительности требуют проведения дополнительных исследований, связанных с поиском критериев полезности и определением их чувствительности. Коэффициенты чувствительности моделей определяются, как и в методе Бэтти, с помощью регрессионного анализа. Модели не предполагают аналитической формулы для вычисления привлекательности ресторана в зависимости от расстояния до анализируемой локации. Такая особенность методов не позволяет автоматизировать построение тепловых карт только лишь на данных из открытых ГИС (геоинформационных систем). Нужно выполнить каким-либо образом разделение города на районы, а также реализовать сбор информации о предпочтениях потребителей для выделенных районов города. На конечном этапе работы необходимо задействовать регрессионный анализ для нахождения необходимых коэффициентов используемой модели.

УЧЁТ АГЛОМЕРАЦИИ КОНКУРЕНТОВ

Модель Фотерингема имеет особенность вычисления привлекательности анализируемого объекта в зависимости от меры централизованности. Мера централизованности позволяет учитывать влияние на привлекательность объектов их взаимное расположение. Предполагается, что потенциальный клиент будет предпочитать посещение объекта, рядом с которым есть альтернативные похожие заведения. Логика учёта подобного подхода для клиентов ресторанов состоит в том, чтобы у потенциального посетителя была возможность быстро сменить ресторан в случае неудовлетворения его ожиданий от выбранного объекта. При определении клиентом предпочтительного ресторана учитываются районы города, в которых существует множество альтернативных вариантов. Потому привлекательность локации с большим количеством расположенных рядом конкурентов будет выше. Мера централизованности фактически определяет бизнес-активность геолокации. Таким образом учитывается агломерация ресторанного бизнеса. В качестве учёта меры централизованности в модели Фотерингема используется формула:

$$C_j = \frac{\sum_{k=1}^M D_{jk}}{M-1} \quad j = 1..M, \quad k = 1..M, \quad (5)$$

где C_j – мера централизованности ресторана j , т. е. среднее расстояние от ресторана j до остальных ресторанов;

M – количество ресторанов;

D_{jk} – расстояние между ресторанами j и k , для всех k , отличных от j (если $j = k$, то расстояние будет равно нулю).

Фактически коэффициент C_j показывает среднее расстояние ресторана до конкурентов. Чем больше этот показатель, тем изолированнее расположен исследуемый объект.

Для построения зон агломерации для города Лиссабона используем формулу (5) с небольшим изменением. В модели Фотерингема мера централизованности вычислялась для мест расположения ресторанов. Мы же вычислили среднее расстояние от любой точки на карте до всех ресторанов одного сегмента. В результате получили тепловую карту агломерации ресторанного бизнеса (рис. 4). Данная карта показывает исторически сложившиеся предпочтения размещения ресторанов в анализируемом городе. Она позволяет наглядно показать плотность размещения ресторанов. Сама по себе данная карта без учёта дополнительных геофакторов не позволяет принять решение о размещении бизнеса. ЛПР нужно учесть плотность населения, его платёжеспособность, трафик перемещения жителей города и проанализировать целевые сегменты, на которые ориентирован ресторан. Однако зоны усиления конкуренции эта карта хорошо отражает.

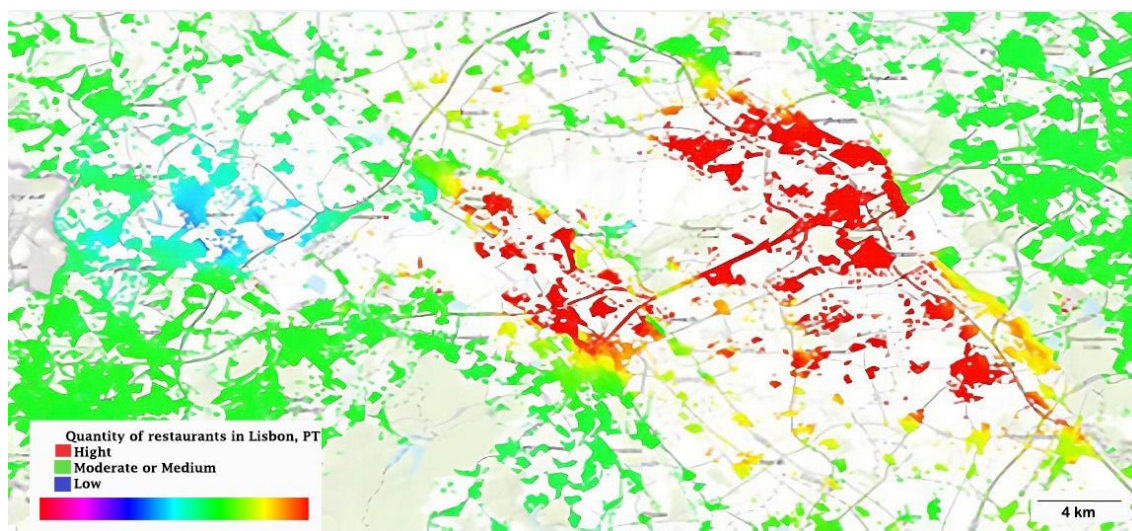


Рисунок 4 – Тепловая карта агломерации ресторанного бизнеса

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ УЧЁТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЦИЙ РЕСТОРАННОГО БИЗНЕСА

Для более точного учёта многофакторной конкуренции удобно использовать гибридную модель на основе рассмотренных в [4, 8] вероятностных многокритериальных моделей пространственных предпочтений. В основе предлагаемой модели используется метод Хаффа. Однако оценка привлекательности ресторанов-конкурентов осуществляется в многокритериальных условиях,

где критериями служат вкусовые, эстетические и дизайнерские предпочтения посетителей. Их значения извлекаются из специализированных ресторанных сервисов.

Рассматривая особенности модели Хаффа (учитывающей уменьшение привлекательности с увеличением расстояния до ресторана), модели Наканиши – Купера (позволяющей реализовать многокритериальный подход учёта привлекательности на основе мультипликативной свёртки) и модели Фотерингема (выполняющей учёт меры централизованности торговых точек), предлагаем для анализа вероятности посещения ресторана следующую аналитическую модель:

$$P_{ij} = \frac{C_j^\theta (\prod_{k=1}^S (A_{jk})^{\gamma_k})^\alpha D_{ij}^\beta}{\sum_{j=1}^M (C_j^\theta (\prod_{k=1}^S (A_{jk})^{\gamma_k})^\alpha D_{ik}^\beta)}, \quad (6)$$

где P_{ij} – вероятность того, что потребитель из локации i на карте посетит ресторан j ;

M – множество конкурирующих ресторанов;

S – множество анализируемых критериев;

D_{ij} – расстояние между локацией i на карте и рестораном j ;

α, β – параметры чувствительности; в соответствии с законом Рейли, $\alpha = 1$ и $\beta = -2$;

A_{jk} – оценка критерия k для ресторана j ;

γ_k – параметр влияния k -го критерия привлекательности на совокупный критерий привлекательности (чувствительность k -го критерия);

C_j – мера централизованности ресторана j , т. е. среднее расстояние от ресторана j до остальных ресторанов;

θ – параметр влияния меры централизованности; $\theta = 0$ в случае отсутствия учёта меры централизованности; $\theta < 0$, если конкуренты рядом делают привлекательным геолокацию и $\theta > 0$, если близко расположенные конкуренты отпугивают потенциальных клиентов.

Фактически параметр θ определяет стратегию бизнеса: нейтральную позицию ($\theta = 0$), агрессивную конкуренцию ($\theta < 0$) или поиск неудовлетворенных имеющимся ресторанным бизнесом зон ($\theta > 0$).

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ КАРТЫ ПРИОРИТЕТНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ОТКРЫТИЯ РЕСТОРАННОГО БИЗНЕСА

Чтобы определить потенциал локации для ресторанного бизнеса, используем следующий алгоритм:

1. Для каждой локации вычисляем её совокупную полезность. Она определяется как общая полезность, которую формируют все конкурирующие рестораны с учётом расстояния до них (см. знаменатель формулы (6)).

2. Выбираем максимальное значение совокупной полезности из всех рассмотренных локаций по формуле (7). Формула (7) получена из формулы (6). Она определяет локацию с наиболее высокой совокупной полезностью. В этой локации формируется самый высокий показатель полезности для потенциального клиента, т. е. наиболее высокое предложение ресторанных услуг в городе. Поэтому не имеет смысла открывать здесь новый ресторанный бизнес, если только не планируется поглотить или разорить имеющихся конкурентов:

$$\text{Max } A = \max_{i \in N} \sum_{j=1}^M (C_j^\theta (\prod_{k=1}^S (A_{jk})^{\gamma_k})^\alpha D_{ij}^\beta), \quad (7)$$

где $\text{Max } A$ – максимальное значение суммы приоритетности всех конкурирующих ресторанов из всех анализируемых локаций (см. формулу (7));

N – множество анализируемых локаций;

M – множество конкурирующих ресторанов;

S – множество анализируемых критериев;

D_{ij} – расстояние между локацией i на карте и рестораном j ;

α, β – параметры чувствительности; в соответствии с законом Рейли, $\alpha = 1$ и $\beta = -2$.

A_{jk} – оценка критерия k для ресторана j ;

γ_k – параметр влияния k -го критерия привлекательности на совокупный критерий привлекательности;

θ – параметр влияния меры централизованности.

3. Для любой локации разница между максимальным значением совокупной полезности (см. формулу (7)) и текущей совокупной полезностью будет показывать недооцененный потенциал данной локации. Нормируя его, получаем относительную меру недооцененности локации (формула (8)):

$$P_i = \frac{\text{Max } A - \sum_{j=1}^M (C_j^\theta (\prod_{k=1}^S (A_{jk})^{\gamma_k})^\alpha D_{ij}^\beta)}{\text{Max } A}, \quad (8)$$

где P_i – нормированная мера недооцененности локации i по сравнению с локацией, имеющей самую высокую полезность. Остальные параметры формулы (8) описаны в пункте 2 алгоритма. Фактически значение P_i показывает относительную величину недостатка в данной локации ресторанных услуг.

Формула (8) позволяет построить тепловую карту города, показывающую неудовлетворённость локаций в ресторанных услугах. Однако повышение удовлетворённости какой-либо локации не гарантирует эффективности ресторанного бизнеса. Для объективного анализа требуется учитывать количество потенциальных клиентов в рассматриваемых точках. То есть проанализировать плотность населения, трафик рядом расположенных магистралей, количество привлечённых людей из других районов окружающими локацию достопримечательностями. Такие дополнительные данные позволяют прогнозировать потенциал в клиентах, а не в относительной мере. Последнее важно потому, что повышение полезности локации в районе с малым количеством потенциальных клиентов не даст коммерческого успеха, да и удовлетворит лишь малое число жителей города.

Наиболее простая модель учета привлекательности локации для семейных ресторанов подразумевает перемножение величины недостатка в ресторанных услугах (формула (8)) и показателя населенности локации. Параметр населенности показывает плотность потенциальных клиентов в рассматриваемой территории. Для семейных ресторанов предполагается привлечение местных жителей, а потому рассматриваем в качестве потенциальных клиентов только проживающее рядом население. Величина недостатка в ресторанных услугах формирует рычаг для привлечения к новому ресторану большего числа потенциальных клиентов. При вычислении плотности населения в локациях возможно использовать модель Кларка (формула (9)). Она учитывает распределение населения в зависимости от расстояния до центра города [1]:

$$D = ae^{-br}, \quad (9)$$

где D – плотность населения в рассчитываемом районе города;

a – плотность населения в центре города;

b – корректирующий коэффициент;

r – расстояние до рассчитываемого района города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Недостатками классических моделей пространственного предпочтения можно считать отсутствие учёта особенностей инфраструктуры города. Реальная местность обладает ограничениями на перемещение. Это естественные препятствия: перепады высот, овраги, реки, ручьи. Также могут встречаться искусственные ограничения: заборы, скоростные магистрали, крупные строения. Если влияния таких ограничений существенно, то изменения в инфраструктуре города будут делать неадекватной параметризацию построенных ранее моделей. Современный город динамичен и перерасчет изменений на построенной модели должен осуществляться без проведения трудоёмких и затратных по времени социальных опросов. Расчёт должен учитывать изменение расстояний до ресторанов от разных локаций при изменении инфраструктуры города. Более просто можно определить данную особенность следующим выражением: «Рассчитали на бумаге, но забыли про овраги, а по ним ходить». Прямое расстояние объектов, замеренное на плоской карте, и реальный путь перемещения между ними с учётом ограничивающих факторов могут существенно отличаться.

Список источников

1. Балаш, О. С. Пространственный анализ размещения торговых предприятий Саратова / О. С. Балаш // Поволжский торгово-экономический журнал. – 2010. – № 4. – С. 13–22.
2. Варвашеня, А. А. Использование имиджевого коэффициента территории при оценки торговых зон торгового обслуживания / А. А. Варвашеня // Научные труды Республиканского института высшей школы. Философско-гуманитарные науки. – 2017. – № 16. – С. 336–343.
3. Дагаев, А. В. Применение математических методов при обработке экономической информации / А. В. Дагаев, А. А. Сорокин, Р. А. Коваленко, Е. А. Яковлева // Модернизация российской экономики: прогнозы и реальность : сборник материалов III Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 149–156.
4. Костерин, И. Г. Пространственный анализ предпочтений покупателей розничных магазинов на территории города / И. Г. Костерин // Практический маркетинг. – 2007. – № 10 (128). – С. 2–12.
5. Кузнецов, М. А. Использование геоинформационных систем для анализа привлекательности торговых точек города / М. А. Кузнецов, П. Д. Кравченя, В. С. Скринкович, Л. В. Володченков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 3 (55). – С. 62–71.
6. Николаева, Т. И. Выбор эффективного месторасположения магазина: маркетинговые и логистические подходы / Т. И. Николаева, Ю. Г. Кузменко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2017. – Т. 11, № 1. – С. 130–136.
7. Опокина, Н. А. Оценка места для эффективного расположения потенциального ритейла на основе математических методов в экономике / Н. А. Опокина // Казанский экономический вестник. – 2017. – № 5 (31). – С. 48–52.
8. Тихонова, М. А. Пространственные модели потребительского поведения / М. А. Тихонова // Синергия наук. – 2016. – № 6. – С. 137–158.

9. Тихонова, М. А. Торговая зона: методы установления границ / М. А. Тихонова // Синергия наук. – 2017. – № 8. – С. 94–101.

10. Masao, Nakanishi. Parameter Estimation for a Multiplicative Competitive Interaction Model Least Squares Approach / Masao Nakanishi, Lee G. Cooper // researchgate.com. – URL: https://www.researchgate.net/publication/243780731_Parameter_Estimation_for_a_Multiplicative_Competitive_Interaction_Model_Least_Squares_Approach (дата обращения: 23.03.2023).

References

1. Balash, O. S. Prostranstvennyy analiz razmeshcheniya torgovykh predpriyatiy Saratova [Spatial analysis of the trade enterprises location in Saratov]. *Povolzhskiy torgovo-ekonomicheskii zhurnal* [Volga Trade and Economic Journal], 2010, no. 4, pp. 13–22.

2. Varvashenya, A. A. Ispolzovanie imidzhevogo koefitsienta territorii pri otsenke torgovykh zon torgovogo obsluzhivaniya [The use of the territory image coefficient in the evaluation for trade areas of trade services]. *Nauchnye trudy Respublikanskogo instituta vysshey shkoly. Filosofsko-gumanitarnye nauki* [Scientific works of the Republican Higher Education Institute. Philosophical and human sciences], 2017, no. 16, pp. 336–343.

3. Dagaev, A. V., Sorokin, A. A., Kovalenko, R. A., Yakovleva, E. A. Primenenie matematicheskikh metodov pri obrabotke ekonomicheskoy informatsii [Application of mathematical methods in the economic information processing]. *Modernizatsiya rossiyskoy ekonomiki: prognozy i realnost' : sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modernization of the Russian economy: forecasts and reality : proceedings of the III International scientific and practical conference], 2019, pp. 149–156.

4. Kosterin, I. G. Prostranstvennyy analiz predpochteniy pokupateley roznichnykh magazinov na territorii goroda [Spatial analysis of the retail stores consumer preferences in the city]. *Prakticheskii marketing* [Practical Marketing], 2007, no. 10 (128), pp. 2–12.

5. Kuznetsov, M. A., Kravchenya, P. D., Skrinkovich, V. S., Volodchenkov, L. V. Ispolzovanie geoinformatsionnykh sistem dlya analiza privlekatelnosti torgovykh tochek goroda [Using a geographic information systems for analyzing the attractiveness of urban trade location]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 3 (55), pp. 62–71.

6. Nikolaeva, T. I., Kuzmenko, Yu. G. Vybor effektivnogo mestoraspolozheniya magazina: marketingovye i logisticheskie podkhody [Choosing an effective store location: marketing and logistics approaches]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i menedzhment* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and management], 2017, vol. 11, no. 1, pp. 130–136.

7. Opokina, N. A. Otsenka mesta dlya effektivnogo raspolozheniya potentsialnogo riteyla na osnove matematicheskikh metodov v ekonomike [Evaluation of a place for the effective location of potential retail based on mathematical methods in economics]. *Kazanskiy ekonomicheskii vestnik* [Kazan Economic Bulletin], 2017, no. 5 (31), pp. 48–52.

8. Tikhonova, M. A. Prostranstvennye modeli potrebitelskogo povedeniya [Spatial models of consumer behavior]. *Sinergiya nauk* [Synergy of Sciences], 2016, no. 6, pp. 137–158.

9. Tikhonova, M. A. Torgovaya zona: metody ustanovleniya granits [Trade zone: methods of establishing boundaries]. *Sinergiya nauk* [Synergy of Sciences], 2017, no. 8, pp. 94–101.

10. Nakanishi, Masao, Cooper Lee, G. Parameter Estimation for a Multiplicative Competitive Interaction Model Least Squares Approach. *researchgate.com*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/243780731_Parameter_Estimation_for_a_Multiplicative_Competitive_Interaction_Model_Least_Squares_Approach (accessed 23 March 2023).

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; одобрена после рецензирования 10.04.2023; принята к публикации 18.04.2023.

The article was submitted 03.04.2023; approved after reviewing 10.04.2023; accepted for publication 18.04.2023.

УДК 004.89

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕДУКЦИИ НЕЧЁТКИХ ПРАВИЛ В МОДЕЛЯХ ОЦЕНКИ ДИСКРЕТНОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Дагаева Мария Витальевна, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, аспирант, ORCID: 0000-0002-5444-9669, e-mail: Dagaevam@rambler.ru

Катасёв Алексей Сергеевич, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-9446-0491, e-mail: ASKatasev@kai.ru

Описана задача редукции нечётких правил в моделях оценки дискретного состояния объектов. Произведён анализ подхода к формированию баз знаний на примере модели коллектива нечётких нейронных сетей. Показано, что формируемые базы знаний за счёт большого объёма и наличия лингвистически идентичных правил являются избыточными. Актуализирована задача редукции формируемых нечётких правил с возможностью оценки состояния объектов с высокой степенью точности. Для её решения разработаны и описаны метод редукции исходной базы знаний, генетический алгоритм построения функций принадлежности для типичных представителей лингвистически идентичных правил, метод редукции промежуточной базы знаний, а также генетический алгоритм минимизации состава нечётких правил для получения искомой базы знаний. Для апробации разработанных методов и алгоритмов произведена редукция нечёткой базы знаний для оценки функционального состояния усталости водителей автотранспортных средств. Общее число нечётких правил в базе знаний снижено на 98,77 %, а её классифицирующая способность повышена на 1,47 %. Полученные результаты указывают на эффективность разработанных методов и алгоритмов редукции нечётких правил и возможность их практического использования.

Ключевые слова: нечёткое правило, нечёткая модель, база знаний, оценка состояния объекта, редукция нечётких правил, функция принадлежности, генетический алгоритм, пупиллометрия, функциональное состояние человека

METHODS AND ALGORITHMS OF FUZZY RULES REDUCTION IN MODELS FOR OBJECTS DISCRETE STATE ASSESSING

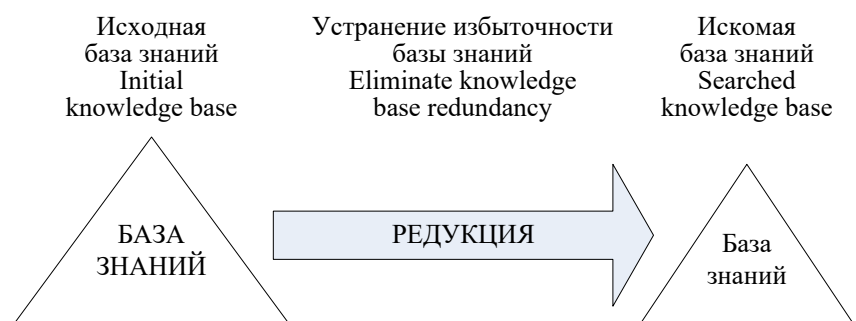
Dagaeva Maria V., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, 10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation, postgraduate student, ORCID: 0000-0002-5444-9669, e-mail: Dagaevam@rambler.ru

Katasev Alexey S., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, 10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-9446-0491, e-mail: ASKatasev@kai.ru

The problem of reduction of fuzzy rules in models for assessing the discrete state of objects is described. An analysis of the approach to the formation of knowledge bases is made on the example of a model of a fuzzy neural network collective. It is shown that the formed knowledge bases due to the large volume and the presence of linguistically identical rules are redundant. The problem of reduction of formed fuzzy rules with the possibility of assessing the state of objects with a high degree of accuracy has been updated. To solve it, a method for reducing the initial knowledge base, a genetic algorithm for constructing membership functions for typical representatives of linguistically identical rules, a method for reducing an intermediate knowledge base, as well as a genetic algorithm for minimizing the composition of fuzzy rules to obtain the desired knowledge base have been developed and described. To test the developed methods and algorithms, the fuzzy knowledge base was reduced to assess the functional state of fatigue of motor vehicle drivers. The total number of fuzzy rules in the knowledge base is reduced by 98.77 %, and its classifying ability is increased by 1.47 %. The results obtained indicate the effectiveness of the developed methods and algorithms for the reduction of fuzzy rules and the possibility of their practical use.

Keywords: fuzzy rule, fuzzy model, knowledge base, assessment of the state of an object, reduction of fuzzy rules, membership function, genetic algorithm, pupillometry, human functional state

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения задач оценки состояния объектов часто используются нечёткие модели с дискретным выходом [1–3]. Такие модели входят в состав систем поддержки принятия решений (СППР) [4–6] и на основе анализа значений входных переменных $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ оцениваемого объекта позволяют выбирать его конкретное состояние y из заданного дискретного множества $\{B_1, B_2, \dots, B_K\}$. При этом СППР и используемые в них нечёткие модели предлагают человеку предварительное решение, помогая ему с большей уверенностью в правильности своего выбора принять окончательное решение. Использование при оценке состояния объекта нечётких правил вызывает доверие со стороны человека к предлагаемым СППР решениям [7].

При реализации такого подхода к оценке состояния объекта важным является не столько механизм формирования нечёткой базы знаний (БЗ) [8, 9], входящей в состав нечёткой модели, сколько её особенности с точки зрения состава сформированных нечётких правил и их использования в алгоритме логического вывода. Например, в работе [10] предложен подход к формированию базы знаний на основе модели коллектива, состоящего из N нечётких нейронных сетей (ННС). При этом БЗ формируется в виде совокупности N систем правил. Такой подход моделирует работу N различных экспертов, каждый из которых независимо друг от друга формирует соответствующую систему правил. Оценка состояния объекта реализуется через процедуру «голосования». В качестве итоговой оценки состояния объекта выступает та, за которую «проголосовало» большинство систем нечётких правил. В повседневной человеческой деятельности такой вариант принятия решений применяется наиболее часто, так как чаще всего решения, зависящие от нескольких людей, принимаются простым большинством голосов.

Анализ этого подхода позволил выделить следующие особенности формируемых баз знаний и их использования для оценки состояния объектов:

- 1) базы знаний, сформированные на основе модели коллектива ННС, состоят из совокупностей систем нечетких правил;
- 2) наличие совокупности систем правил в базах знаний порождает лингвистически-идентичные (похожие) правила (с одинаковым набором антецедентов и консеквентов);
- 3) базы знаний часто имеют большой объём (число правил резко возрастает при увеличении числа входных переменных, числа их значений и числа состояний объекта);
- 4) базы знаний используются в системах поддержки принятия решений в составе нечётких моделей;
- 5) каждая система правил базы знаний (совместно с алгоритмом вывода) предлагает «свое» решение по оценке состояния объекта;
- 6) итоговое решение вычисляется методом простого «голосования» (большинством голосов).

Таким образом, формируемые нечёткие базы знаний за счёт большого объёма и наличия лингвистически идентичных правил априорно являются избыточными, что актуализирует необходимость их редукции [11]. Рассмотрим предложенные в работе методы и алгоритмы решения указанной задачи.

МЕТОД РЕДУКЦИИ ИСХОДНОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Под исходной базой знаний будем понимать БЗ, сформированную на основе модели коллектива ННС [10]. На рисунке 1 представлена схема разработанного метода её редукции.

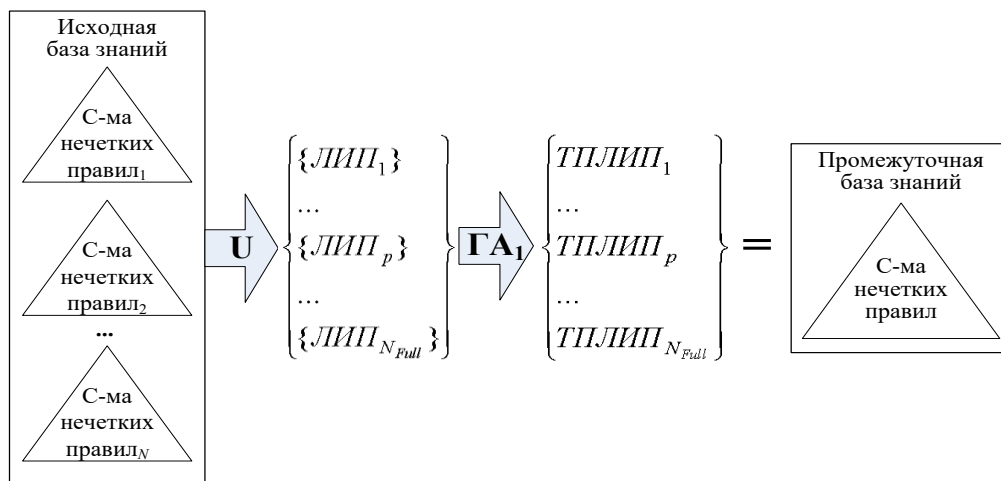


Рисунок 1 – Схема метода редукции исходной базы знаний

На схеме используются следующие обозначения:

- $\{ЛИП_p\}$ ($p = 1..N_{Full}$) – подмножества лингвистически идентичных правил (ЛИП) мощностью N ;
- N_{Full} – полное множество нечётких правил в каждой системе;
- $\cup$ – операция объединения лингвистически идентичных правил в соответствующие подмножества;
- $ТПЛИП_p$ – типичные представители подмножеств лингвистически идентичных правил $\{ЛИП_p\}$;
- $ГА_1$ – генетический алгоритм для идентификации значений параметров $ТПЛИП$.

Таким образом, судя по представленной схеме, в результате редукции формируется промежуточная БЗ, состоящая из типичных представителей лингвистически идентичных правил.

Рассмотрим этапы разработанного метода:

1. Поиск и объединение лингвистически идентичных правил исходной базы знаний в соответствующие подмножества.

2. Формирование $ТПЛИП_p$ для каждого подмножества $\{ЛИП_p\}$ ($p = 1..N_{Full}$) путём генерации новых правил с идентификацией значений параметров их функций принадлежности на основе генетического алгоритма (ГА).

3. Объединение $ТПЛИП_p$ ($p = 1..N_{Full}$) в промежуточную базу знаний.

Очевидно, что первый и третий этапы предложенного метода тривиальны и не требуют дополнительных пояснений. Второй этап требует разработки специального генетического алгоритма. Рассмотрим этот алгоритм более подробно.

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ТИПИЧНЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ЛИНГВИСТИЧЕСКИ ИДЕНТИЧНЫХ ПРАВИЛ

Пусть $\{ЛИП_p\} = \{ЛИП_{p1}, ..., ЛИП_{pl}, ..., ЛИП_{pN}\}$ ($p = 1..N_{Full}$, $l = 1..N$) – подмножества лингвистически идентичных правил исходной базы знаний с соответствующими наборами функций принадлежности (ФП) $ФП_{p1}, ..., ФП_{pl}, ..., ФП_{pN}$. Необходимо разработать генетический алгоритм, позволяющий сформировать $ТПЛИП_p$ для каждого подмножества $\{ЛИП_p\}$ ($p = 1..N_{Full}$) с соответствующим набором функций принадлежности $ФП_p$.

На рисунке 2 представлена схема применения генетического алгоритма.

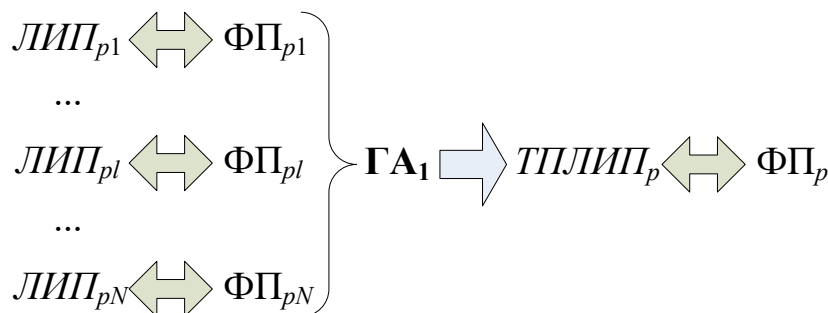


Рисунок 2 – Схема применения генетического алгоритма

Задача ГА заключается в идентификации значений параметров $ФП_p$ ($p = 1..N_{Full}$) по значениям параметров исходных $ФП_{pl}$ ($l = 1..N$) при условии максимизации точности оценки состояния объекта на обучающей выборке данных с использованием формируемых нечетких правил. Здесь и далее предполагается возможность получения как обучающей, так и тестовой выборки данных, используемых при формировании исходной базы знаний.

Разработка любого генетического алгоритма требует предварительного кодирования параметров решаемой задачи [12]. Рассмотрим вопросы кодирования на примере трёх ЛИП с треугольными ФП.

Пусть $\tilde{A}_1$, $\tilde{A}_2$ и $\tilde{A}_3$ – исходные функции принадлежности трёх ЛИП, характеризующие одну и ту же лингвистическую категорию (рис. 3).

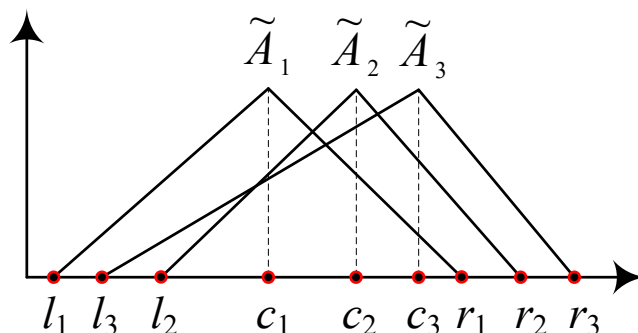


Рисунок 3 – Пример исходных функций принадлежности

Задачей генетического алгоритма является анализ исходных ФП и на их основе построение ФП $\tilde{A}$ с параметрами l (левое основание), c (мода) и r (правое основание). Для этого предварительно необходимо выполнить следующие этапы:

1. Определить диапазон возможных значений параметров $p \in \{l, c, r\}$ искомой ФП:
 $p \in [\min; \max]: l \in [l_1; l_2], c \in [c_1; c_3], r \in [r_1; r_3]$.
2. Закодировать значения $p \in \{l, c, r\}$: разбить диапазон на $2^m - 1$ отрезков (m – целое число) и границами отрезков считать значения p .
3. Закодировать искомую ФП хромосомой $H_{\text{ФП}} = H_l + H_c + H_r$, где знак «+» означает операцию конкатенации хромосом.
4. Закодировать нечёткое правило промежуточной БЗ в следующем виде:

$$H_{\text{Rule}} = H_{\text{ФП}}^1 + \dots + H_{\text{ФП}}^i + \dots + H_{\text{ФП}}^n.$$

5. Закодировать промежуточную БЗ в виде:

$$H_{\text{БЗ}} = H_{\text{Rule}}^1 + \dots + H_{\text{Rule}}^p + \dots + H_{\text{Rule}}^{N_{\text{Full}}}.$$

6. Задать фитнес-функцию для оценки промежуточной БЗ:

$$F(H_{\text{БЗ}}) = \frac{N_{\text{train}_t}}{N_{\text{train}}}, \quad (1)$$

где N_{train} – объем обучающей выборки; N_{train_t} – число правильно классифицированных обучающих примеров.

Критерием выбора лучшей хромосомы выступает максимизация значения фитнес-функции.

После выбора и кодирования параметров задачи в генетическом алгоритме рассмотрим его этапы:

1. Создание случайным образом начальной популяции хромосом, кодирующих промежуточную БЗ:

$$H = \{H_1, \dots, H_x, \dots, H_X\} \in H_{\text{БЗ}},$$

где $X < Y$, $Y = 3nN_{\text{Full}} \cdot 2^m$ – объем полного хромосомного набора.

2. Оценка полезности хромосом H_x на основе вычисления $F(H_x)$ по формуле (1).
3. Выбор двух родительских хромосом методом турнирного отбора [13].
4. Скрещивание родительских хромосом методом g-точечного кроссинговера [14] и получение двух дочерних хромосом.

5. Мутация генов дочерних хромосом с вероятностью $p = L^{-1}$, где L – длина хромосом.

6. Оценка полезности дочерних хромосом.

7. Удаление двух худших хромосом из популяции.

8. Повторение этапов 3–7 пока происходит улучшение приспособленности хромосом в популяции.

9. Из текущей популяции выбор хромосомы H^* с лучшей приспособленностью.

Таким образом, H^* – искомая хромосома, кодирующая промежуточную базу знаний.

МЕТОД РЕДУКЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ

После предварительной редукции исходной БЗ формируется промежуточная, объем которой уменьшается по сравнению с объемом исходной БЗ в N раз. Но при этом промежуточная база знаний может содержать ещё большое количество избыточных правил. Для их дополнительной редукции разработан специальный метод (рис. 4).

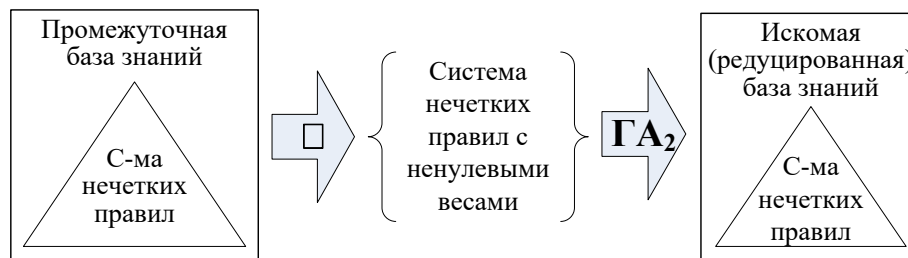


Рисунок 4 – Схема метода редукции промежуточной базы знаний

На схеме используются следующие обозначения:

- $\emptyset$ – операция удаления «пустых» правил из БЗ;
- $ГА_2$ – генетический алгоритм для получения искомой БЗ.

Метод состоит из этапа исключения из БЗ «пустых» правил и уменьшения состава оставшихся правил на основе дополнительного ГА. Очевидно, что первый этап предложенного метода тривиальный и не требует дополнительных пояснений. Второй этап требует разработки специального генетического алгоритма. Рассмотрим этот алгоритм более подробно.

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ СОСТАВА НЕЧЁТКИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКОМОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Пусть $БЗ_{\emptyset} = \{Rule_1, \dots, Rule_{N_{\emptyset}}\}$ – промежуточная база знаний без «пустых» нечётких правил, где $N_{\emptyset}$ – количество правил в $БЗ_{\emptyset}$. Тогда задача генетического алгоритма заключается в поиске хромосомы, соответствующей минимальному составу нечётких правил при условии максимизации точности оценки состояния объекта на тестовой выборке данных.

Рассмотрим вопросы кодирования параметров этой задачи в генетическом алгоритме. Пусть «1» означает наличие правила в базе знаний, а «0» – отсутствие правила [15]. Тогда любая БЗ $\in БЗ_{\emptyset}$ может быть закодирована хромосомой $h_{БЗ}$, состоящей из набора нулей и единиц, а хромосома с единичными генами соответствует $БЗ_{\emptyset}$.

Фитнес-функция в данном генетическом алгоритме для оценки БЗ определяется следующим образом:

$$F(h_{БЗ}) = \frac{N_{test_t}}{N_{test}}, \quad (2)$$

где N_{test} – объём тестовой выборки;

N_{test_t} – число верно классифицированных обучающих примеров.

Как и в предыдущем генетическом алгоритме, в качестве критерия выбора лучшей хромосомы выступает максимизация значения фитнес-функции.

Рассмотрим этапы этого генетического алгоритма:

1. Создание случайным образом начальной популяции хромосом, кодирующих искомую БЗ, включая хромосому с единичными генами, соответствующую $БЗ_{\emptyset}$:

$$h = \{h_1, \dots, h_x, \dots, h_X\} \in h_{БЗ},$$

где $X < Y$, $Y = 2^{N_{\emptyset}}$ – объём полного хромосомного набора.

2. Оценка полезности хромосом h_x на основе вычисления $F(h_x)$ по формуле (2).

3. Выбор двух родительских хромосом методом турнирного отбора [13].

4. Скрещивание родительских хромосом методом g-точечного кроссинговера [14] и получение двух дочерних хромосом.

5. Мутация генов дочерних хромосом с вероятностью $p = L^{-1}$, где L – длина хромосом ($L = N_{\emptyset}$).

6. Оценка полезности дочерних хромосом.

7. Удаление двух худших хромосом из популяции.

8. Повторение этапов 3–7, пока происходит улучшение приспособленности хромосом в популяции.

9. Из текущей популяции выбор хромосомы h^* с лучшей приспособленностью.

Таким образом, h^* – хромосома, кодирующая искомую БЗ.

При наличии в текущей популяции нескольких хромосом с одинаковым максимальным значением приспособленности выбирается та из них, которая соответствует БЗ меньшей размерности.

АПРОБАЦИЯ

Рассмотрим результаты апробации разработанных методов и алгоритмов на примере редукции БЗ для оценки состояния усталости водителей автотранспортных средств [16]. Состояние усталости водителей оценивалось на основе метода пупиллометрии [17–20], заключающегося в получении

и анализе пупиллограмм [21–24]. При формировании исходной базы знаний использована собственная выборка данных, содержащая значения следующих параметров [16]: D_{min} – минимальный диаметр зрачка; D_{ps} – диаметр половинного сужения; A_s – амплитуда сужения; t_s – время сужения зрачка. Исходные данные включали 1200 записей, из которых половина соответствовала состоянию бодрствования водителей, а оставшиеся данные – состоянию сильного утомления. При формировании базы знаний для каждого из параметров выделялись по 5 нечётких градаций следующего типа: «малый», «ниже среднего», «средний», «выше среднего», «большой». База знаний включала 7 систем правил. В таблице 1 представлены результаты редукции.

Таблица 1 – Результаты редукции базы знаний для оценки состояния усталости водителей

База знаний	Число нечетких правил	Классифицирующая способность, %
Исходная	8750	95,3
Промежуточная	1250	96,7
Искомая (редуцированная)	108	96,7

В исходной БЗ содержалось 8750 правил. Её классифицирующая способность на тестовой выборке составила 95,3 %. Первый этап редукции позволил сократить объём базы знаний в 7 раз. Число правил промежуточной БЗ составило 1250, а её классифицирующая способность повысилась на 1,47 %. Второй этап редукции позволил сократить объём промежуточной базы знаний в 11,57 раза. Число правил искомой базы знаний составило 108. При этом её классифицирующая способность осталась на уровне 96,7 %.

Таким образом, редукция исходной базы знаний привела к устранению её избыточности на 98,77 % и повышению классифицирующей способности на 1,47 %. Полученные результаты указывают на эффективность разработанных методов и алгоритмов и возможность их использования для улучшения нечётких моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в работе методы и алгоритмы прошли апробацию и используются в научных исследованиях и разработках центра интеллектуальных транспортных систем ГБУ «Безопасность дорожного движения» при формировании и редукции БЗ для оценки функционального состояния водителей. Полученные результаты планируется использовать при разработке СППР для оценки состояния водителей во время управления транспортным средством, а также при прохождении ими процедуры предрейсового медицинского осмотра. Разработанные методы и алгоритмы могут быть также использованы для редукции нечётких БЗ по оценке дискретного состояния объектов в других предметных областях.

Список источников

1. Ажмухамедов, И. М. Оценка компетентности выпускников высших учебных заведений по направлению подготовки «Информационная безопасность» на основе нечеткого когнитивного подхода / И. М. Ажмухамедов, О. М. Князева, Н. В. Давидюк, Т. Г. Гурская // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 1. – С. 115–124.
2. Кузнецова, В. Ю. Нечеткий подход при кластеризации заемщиков микрофинансовых организаций / В. Ю. Кузнецова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 1–8.
3. Катасёва, Д. В. Нечетко-продукционная модель оценки состояния объектов в системах поддержки принятия решений / Д. В. Катасёва // Вестник Технологического университета. – 2021. – Т. 24, № 12. – С. 105–108.
4. Яцало, Б. И. Нечеткая многокритериальная система поддержки принятия решений DECERNSFMCD / Б. И. Яцало, Грицюк С. В., Радаев А. В., Коробов А. В. // Программные продукты и системы. – 2022. – № 2. – С. 171–183.
5. Глушенко, С. А. Система поддержки принятия решений нечеткого моделирования рисков информационной безопасности организации / С. А. Глушенко, А. И. Долженко // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 68–74.
6. Талипов, Н. Г. Система поддержки принятия решений по распределению заданий по ведению реестра операторов персональных данных на основе нечетко-продукционной модели / Н. Г. Талипов, А. С. Катасёв // Кибернетика и программирование. – 2016. – № 6. – С. 96–114.
7. Емалетдинова, Л. Ю. Автоматическая генерация системы нечеткого вывода типа Мамдани на основе существующей системы типа Такаги-Сугено / Л. Ю. Емалетдинова, С. В. Новикова // Программные системы и вычислительные методы. – 2013. – № 2. – С. 151–159.
8. Миловидова, А. А. Формирование нечеткой системы оценки для системы поддержки принятия решений при управлении процессом переработки в условиях неопределенности информации о качестве материала / А. А. Миловидова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 1 (49). – С. 33–48.
9. Катасёва, Д. В. Нейронечеткая модель и программный комплекс формирования баз знаний для оценки состояния объектов / Д. В. Катасёва // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 1 (57). – С. 65–76.
10. Катасёв, А. С. Методы и алгоритмы формирования нечетких моделей оценки состояния объектов в условиях неопределенности / А. С. Катасёв // Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 138–147.
11. Абдулхаков, А. Р. Алгоритм и программный комплекс редукции баз знаний мягких экспертных систем / А. Р. Абдулхаков // Труды МАИ. – 2014. – № 75. – С. 14–19.

12. Глушенко С. А. Обучение нейро-нечеткой сети с помощью генетического алгоритма / С. А. Глушенко, А. И. Долженко // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 5. – С. 79–88.
13. Кобак, В. Г. Сравнение различных подходов турнирного отбора при решении задачи коммивояжера модифицированной моделью Голдберга / В. Г. Кобак, А. Г. Жуковский, С. А. Швидченко, А. А. Пешкевич // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2018. – № 1. – С. 188–191.
14. Нейдорф, Р. А. Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями / Р. А. Нейдорф, В. В. Полях, И. В. Черногоров, О. Т. Ярахмедов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 127–143.
15. Комарцова, Л. Г. Эволюционные методы формирования нечетких баз правил / Л. Г. Комарцова // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2011. – № 1. – С. 181–184.
16. Барина, А. О. Формирование и использование базы знаний для оценки функционального состояния водителей автотранспортных средств / А. О. Барина, Д. В. Катасёва, А. С. Катасёв // Вестник Технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 10. – С. 75–78.
17. Ахметвалеев А. М. Модель коллектива нейронных сетей и программный комплекс для определения функционального состояния человека / А. М. Ахметвалеев, А. С. Катасёв, М. А. Подольская // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2018. – № 1 (41). – С. 69–85.
18. Цимбал М. В. Изменение показателей бинокулярной пупиллометрии после высокой физической нагрузки у лиц, занимающихся спортом / М. В. Цимбал, Н. В. Штейнберг, Д. С. Хомич, Н. А. Егоров, А. В. Туголуков // Спорт. Медицина. – 2019. – Т. 19, № S1. – С. 30–35.
19. Киселева Е. С. Диагностика эмоционального состояния человека методом пупиллометрии / Е. С. Киселева, М. П. Бороненко // Электронные средства и системы управления. – 2018. – № 1–1. – С. 216–220.
20. Ошоров, А. В. Пупиллометрия как метод мониторинга фотореакции в нейрореанимации / А. В. Ошоров, Е. В. Александрова, К. Р. Мурадян, О. Ю. Сосновская, Е. Ю. Соколова, И. А. Савин // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. – 2021. – Т. 85, № 3. – С. 117–123.
21. Исаева, О. Л. Диагностика стресса методом пупиллографии / О. Л. Исаева, М. П. Бороненко // Международного журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 11. – С. 71–75.
22. Сибгатуллин, А. А. Интеллектуальные модели оценки функционального состояния водителей в системах транспортной безопасности / А. А. Сибгатуллин, А. С. Катасёв // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25, № 12. – С. 139–143.
23. Цимбал, М. В. О референтных нормах показателей пупиллометрии при использовании компьютерного комплекса для регистрации и оценки зрачковой реакции / М. В. Цимбал, А. Л. Куцало, Н. В. Штейнберг, Д. С. Хомич // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2020. – № 1 (73). – С. 124–128.
24. Саховская, Н. А. История развития пупиллографии и возможности ее применения в современной офтальмологии / Н. А. Саховская, М. А. Фролов, К. А. Казакова, М. Г. Колодкина // Офтальмология. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 475–481.

References

1. Azhmukhamedov, I. M., Knyazeva, O. M., Davidyuk, N. V., Gurskaya, T. G. Otsenka kompetentnosti vypusnikov vysshikh uchebnykh zavedeniy po napravleniyu podgotovki «Informatsionnaya bezopasnost» na osnove nechetkogo kognitivnogo podkhoda [Competence assessment of graduates of higher educational institutions in the field of study "Information security" based on a fuzzy cognitive approach]. *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], 2017, no. 1, pp. 115–124.
2. Kuznetsova, V. Yu. Nechetkiy podkhod pri klasterizatsii zayemshchikov mikrofinansovykh organizatsiy [Fuzzy approach to clustering borrowers of microfinance organizations]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2020, vol. 8, no. 2, pp. 1–8.
3. Kataseva, D. V. Nechetko-produktsionnaya model otsenki sostoyaniya ob'yektov v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy [Fuzzy-production model for assessing the state of objects in decision support systems]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2021, vol. 24, no. 12, pp. 105–108.
4. Yatsalo, B. I., Gritsyuk, S. V., Radaev, A. V., Korobov, A. V. Nechetkaya mnogokriterialnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniy DECERNSFMCDA [Fuzzy multicriteria decision support system DECERNSFMCDA]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2022, no. 2, pp. 171–183.
5. Glushenko, S. A., Dolzhenko, A. I. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy nechetkogo modelirovaniya riskov informatsionnoy bezopasnosti organizatsii [Decision support system for fuzzy modeling of information security risks of an organization]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2015, vol. 21, no. 1, pp. 68–74.
6. Talipov, N. G., Katasev, A. S. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy po raspredeleniyu zadaniy po vedeniyu reyestra operatorov personalnykh dannykh na osnove nechetko-produktsionnoy modeli [Decision support system for the distribution of tasks for maintaining the register of personal data operators based on a fuzzy production model]. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2016, no. 6, pp. 96–114.
7. Emaletdinova, L. Yu., Novikova, S. V. Avtomaticheskaya generatsiya sistemy nechetkogo vyvoda tipa Mamdani na osnove sushchestvuyushchey sistemy tipa Takagi-Sugeno [Automatic generation of a Mamdani type fuzzy inference system based on an existing Takagi-Sugeno type system]. *Programmnye sistemy i vychislitelnye metody* [Software systems and computational methods], 2013, no. 2, pp. 151–159.
8. Milovidova, A. A. Formirovaniye nechetkoy sistemy otsenki dlya sistemy podderzhki prinyatiya resheniy pri upravlenii protsessom pererabotki v usloviyakh neopredelennosti informatsii o kachestve materiala [Formation of a fuzzy evaluation system for a decision support system in the management of the processing process under the

uncertainty of information about the quality of the material]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 1 (49), pp. 33–48.

9. Kataseva, D. V. Neyronechetkaya model i programmnyy kompleks formirovaniya baz znaniy dlya otsenki sostoyaniya ob'yektov [A neuro-fuzzy model and a software package for generating knowledge bases for assessing the state of objects]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2022, no. 1 (57), pp. 65–76.

10. Katasev, A. S. Metody i algoritmy formirovaniya nechetkikh modeley otsenki sostoyaniya ob'yektov v usloviyakh neopredelennosti [Methods and algorithms for the formation of fuzzy models for assessing the state of objects under uncertainty]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2019, vol. 22, no. 3, pp. 138–147.

11. Abdulhakov, A. R. Algoritmy i programmnyy kompleks reduksii baz znaniy myagkikh ekspertnykh sistem [Algorithm and software package for the reduction of knowledge bases of soft expert systems]. *Trudy MAI* [Proceedings of the MAI], 2014, no. 75, pp. 14–19.

12. Glushenko, S. A., Dolzhenko, A. I. Obucheniye neyro-nechetkoy seti s pomoshchyu geneticheskogo algoritma [Training a neuro-fuzzy network using a genetic algorithm]. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2017, no. 5, pp. 79–88.

13. Kobak, V. G., Zhukovskiy, A. G., Shvidchenko, S. A., Peshkevich, A. A. Sravneniye razlichnykh podkhodov turnirnogo otbora pri reshenii zadachi kommissiyazhera modifitsirovannoy modelyu Goldberga [Comparison of various tournament selection approaches in solving the traveling salesman problem with a modified Goldberg model]. *Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasian branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics], 2018, no. 1, pp. 188–191.

14. Neydorf, R. A., Polyakh, V. V., Chernogorov, I. V., Yarakhmedov, O. T. Issledovaniye evristicheskikh algoritmov v zadachakh prokladki i optimizatsiya marshrutov v srede s prepyatstviyami [Research of heuristic algorithms in laying problems and optimization of routes in an environment with obstacles]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Technical science], 2016, no. 3 (176), pp. 127–143.

15. Komartsova, L. G. Evolyutsionnyye metody formirovaniya nechetkikh baz pravil [Evolutionary methods for the formation of fuzzy rule bases]. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektualnykh sistem* [Open semantic technologies for designing intelligent systems], 2011, no. 1, pp. 181–184.

16. Barinova, A. O., Kataseva, D. V., Katasev, A. S. Formirovaniye i ispolzovaniye bazy znaniy dlya otsenki funktsionalnogo sostoyaniya voditeley avtotransportnykh sredstv [Formation and use of a knowledge base to assess the functional state of motor vehicle drivers]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2020, vol. 23, no. 10, pp. 75–78.

17. Akhmetvaleev, A. M., Katasev, A. S., Podolskaya, M. A. Model kollektiva neyronnykh setey i programmnyy kompleks dlya opredeleniya funktsionalnogo sostoyaniya cheloveka [A model of a collective of neural networks and a software package for determining the functional state of a person]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2018, no. 1 (41), pp. 69–85.

18. Tsybal, M. V., Shteynberg, N. V., Homich D. S., Egorov N. A., Tugolukov A. V. Izmeneniye pokazateley binokulyarnoy pupillometrii posle vysokoy fizicheskoy nagruzki u lits, zanimayushchikhsya sportom [Change in indicators of binocular pupillometry after high physical activity in people involved in sports]. *Chelovek. Sport. Meditsina* [Human. Sport. Medicine], 2019, vol. 19, no. S1, pp. 30–35.

19. Kiseleva, E. S., Boronenko, M. P. Diagnostika emotsionalnogo sostoyaniya cheloveka metodom pupillometrii [Diagnosis of a person's emotional state by pupillometry]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic means and control systems], 2018, no. 1–1, pp. 216–220.

20. Oshorov, A. V., Aleksandrova, E. V., Muradyan, K. R., Sosnovskaya, O. Yu., Sokolova, E. Yu., Savin, I. A. Pupillometriya kak metod monitoringa fotoreaktsii v neyroreanimatsii [Pupillometry as a method for monitoring photoreaction in neuroresuscitation]. *Voprosy neyrokhirurgii im. N.N. Burdenko* [Burdenko's Journal of Neurosurgery], 2021, vol. 85, no. 3, pp. 117–123.

21. Isaeva, O. L., Boronenko, M. P. Diagnostika stressa metodom pupillografii [Diagnosis of stress by pupillography]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research], 2021, no. 11, pp. 71–75.

22. Sibgatullin, A. A., Katasev, A. S. Intellektualnyye modeli otsenki funktsionalnogo sostoyaniya voditeley v sistemakh transportnoy bezopasnosti [Intelligent models for assessing the functional state of drivers in transport security systems]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2022, vol. 25, no. 12, pp. 139–143.

23. Tsimbal, M. V., Kutsalo, A. L., Shteynberg, N. V., Khomich, D. S. O referentnykh normakh pokazateley pupillometrii pri ispolzovanii kompyuternogo kompleksa dlya registratsii i otsenki zrachkovoy reaktsii [On the reference norms of pupillometry indicators when using a computer complex for registration and assessment of pupillary response]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Medical University], 2020, no. 1 (73), pp. 124–128.

24. Sakhovskaya, N. A., Frolov, M. A., Kazakova, K. A., Kolodkina, M. G. Istoriya razvitiya pupillografii i vozmozhnosti yeye primeneniya v sovremennoy oftalmologii [The history of the development of pupillography and the possibility of its application in modern ophthalmology]. *Oftalmologiya* [Ophthalmology], 2022, vol. 19, no. 3, pp. 475–481.

Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023; принята к публикации 02.05.2023.

The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 02.05.2023; accepted for publication 02.05.2023.

DOI 10.54398/20741707_2023_3_28

УДК 004.932.2 : 004.932.72'1 : 004.93'11 : 004.93'12 : 65.011.56

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПИЛОТНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Зубова Екатерина Олеговна, Выксунский филиал НИТУ «МИСИС», 607031, Российская Федерация, г. Выкса, р.п. Шиморское, ул. Калинина, 206,

студент, ORCID: 0009-0009-3930-2931, e-mail: zubovakejt@yandex.ru

Пахалев Алексей Дмитриевич, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

студент, ORCID: 009-0009-4353-9720, e-mail: apahalev@gmail.com

Шамшин Максим Николаевич, Инженерно-технологический центр АО «ВМЗ», 607060, Российская Федерация, г. Выкса, ул. Братьев Баташевых, 45,

начальник лаборатории, ORCID: 009-0001-9571-0245, e-mail: shamshin_mn@omk.ru

Погожева Алена Багдасаровна, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

ассистент кафедры электротехники, электроники и автоматики, ORCID: 0000-0003-3983-4128, e-mail: goddess1806@mail.ru,

В статье приведён анализ возможности применения компьютерного зрения для задачи обнаружения пилотной линии на трубе. Пилотная линия наносится краской в процессе производства, наносимой на поверхность свариваемой из листа трубы. Линия повернута на угол в 90 градусов (в позиции три часа) относительно сварного шва и параллельна ему. Благодаря ей возможно производить, например, позиционирование установки локальной термообработки сварного шва, за счёт которой снимаются остаточные напряжения, образовавшиеся в процессе сварки. Для контроля положения пилотной линии применяются цифровые видеокамеры. В статье рассмотрен способ классификации изображений на основе средневзвешенной яркости изображения и результаты его применения. Для выделения краёв трубы относительно фона и краёв пилотной линии возможно использовать предобработку изображения с применением пороговых фильтров, а затем определять на полученном бинаризованном фрагменте прямые линии. Проанализированы три способа обнаружения границ объекта на изображении (метод пороговой бинаризации, оператор обнаружения краёв Canny Edge Detector и фильтр Габора), а также алгоритм выделения прямых линий Line Segment Detector. Проведена оценка качества работы каждого из способов при решении поставленной задачи. Для реализации данных алгоритмов были использованы программы, написанные на языке Python с использованием библиотеки OpenCV и интерфейса Kivy.

Ключевые слова: компьютерное зрение, локальная термообработка сварного шва, пилотная линия, классификация изображений, фильтрация изображений, метод пороговой бинаризации, оператор обнаружения краёв Canny Edge Detector, фильтр Габора, алгоритм обнаружения прямых линий Line Segment Detector

METHOD FOR IMPROVING PILOT LINE DETECTION PERFORMANCE BASED ON COMPUTER VISION TECHNOLOGIES

Zubova Ekaterina O., Vyksa branch of NUST MISIS, 206 Kalinin St., worker's village Shimorskoe, Vyksa, 607031, Russian Federation,

student, e-mail: zubovakejt@yandex.ru

Pakhalev Alexey D., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

student, e-mail: apahalev@gmail.com, ORCID: 009-0009-4353-9720

Shamshin Maksim N., Engineering and Technology Center of VSW JSC, 45 Brothers Batashev St., Vyksa, 607060, Russian Federation,

Head of Laboratory, e-mail: shamshin_mn@omk.ru, ORCID: 009-0001-9571-0245

Pogozheva Alena B., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

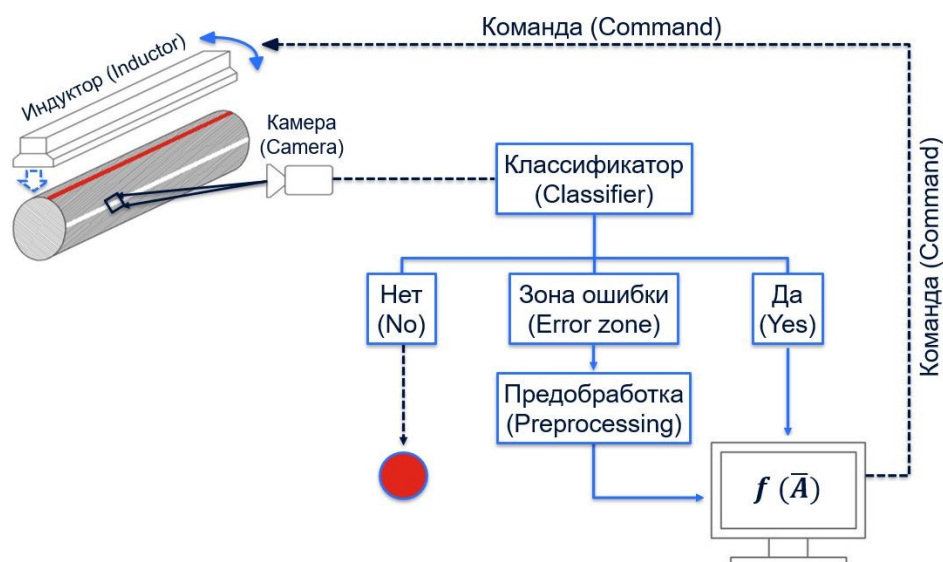
Assistant of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Automation, e-mail: goddess1806@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3983-4128

The article presents an analysis of the possibility of using computer vision for the task of detecting a pilot line on a pipe. The pilot line is applied with paint during the production process, applied to the surface of the pipe being welded from the sheet. The line is rotated at an angle of 90 degrees (at the three o'clock position) relative to the weld and parallel to it. Thanks to it, it is possible, for example, to position the installation of local heat treatment of the weld, due to which residual stresses formed during welding are removed. Digital video cameras are used to monitor the position of the pilot line [12]. The article considers the method of image classification based on the weighted average brightness of the image and the results of its application. To highlight the edges of the pipe relative to the background

and the edges of the pilot line, it is possible to use image preprocessing using threshold filters, and then determine straight lines on the resulting binarized fragment. Three methods of detecting the boundaries of an object in the image (the threshold binarization method, the Canny Edge Detector edge detection operator and the Gabor filter), as well as the algorithm for selecting straight lines Line Segment Detector are analyzed. The evaluation of the quality of work of each of the methods in solving the task was carried out. To implement these algorithms, programs written in Python using the OpenCV library and the Kivy interface were used.

Keywords: computer vision, local heat treatment of the weld, pilot line, image classification, image filtering, threshold binarization method, edge detection operator Canny Edge Detector, Gabor filter, straight line detection algorithm Line Segment Detector

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие технологий компьютерного зрения (Computer Vision, CV) позволяет автоматизировать огромное количество рутинных задач. Активно используются технологии компьютерного зрения и в металлургическом производстве. Компьютерное зрение позволяет применять новые подходы к микроструктурному анализу металлов, включая разработку новых расширенных визуальных показателей и обнаружение взаимосвязей между обработкой, микроструктурой и свойствами металлов [1]. Технологии CV применяются для управления различными металлургическими процессами, например, на прокатном стане алгоритм автоматической идентификации символической строки заготовок помогает при контроле технологического процесса прокатки и архивировании его параметров [2]. Ещё компьютерное зрение применяют для управления таким процессом, как высокочастотная сварка металлических труб, в ходе которой постоянно измеряются параметры, и если они отклоняются от нужного значения, то оператору приходит аварийный сигнал. Когда срабатывает аварийный сигнал, оператор останавливает процесс и изменяет настройки в зависимости от необходимого значения [3]. Как и во многих других производствах, в металлургии применяется автоматический визуальный контроль использования рабочими средств индивидуальной защиты (каска, маски и т. д.) и спецодежды [4]. Вместе с тем в металлургическом производстве применяется автоматический визуальный контроль качества готовой продукции, а именно поиск дефектных элементов и минимизация ошибок, допущенных сотрудниками [5].

В данной работе рассматривается одна из задач металлургического производства, в которой применяются технологии компьютерного зрения – это определение отклонения пилотной линии на трубе от правильного положения. Применяется это, например, в установке локальной термообработки сварного шва, благодаря которой снимаются остаточные напряжения в зоне сварного шва, образовавшиеся в процессе сварки. Для этого в установке используются индукторы (нагреватели), позицию которых можно менять в зависимости от расположения шва на трубе, поскольку нагреватели должны находиться точно над сварным швом. Ориентация индукторов производится автоматической системой при помощи оптического датчика (видеокамеры), который определяет положение пилотной линии, расположенной на 90 градусов от шва и параллельно ему вдоль всей длины трубы. Однако, когда линия на изображении нечёткая, система ошибается, что приводит к неправильной работе оборудования, вследствие чего возникают дефекты [6].

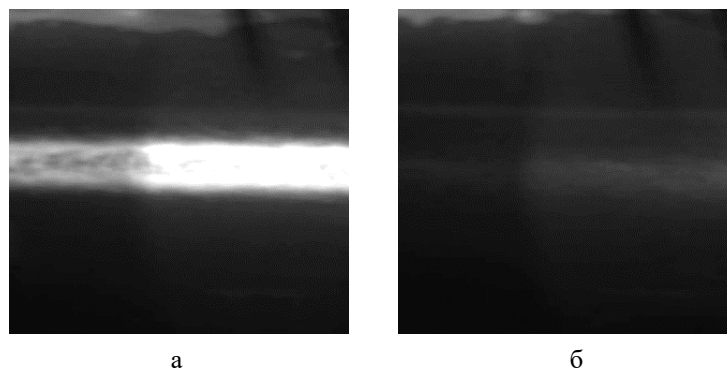


Рисунок 1 – а) система распознала изображение; б) система не распознала изображение

Поэтому была поставлена следующая цель: снизить вероятность образования дефектов путем улучшения обнаружения пилотной линии на трубе и определения ее отклонения от правильного положения.

Данной цели можно достичь, введя дополнительную фильтрацию, например: повышение яркости, эквализацию (выравнивание) гистограммы и т. д. [7]. Однако сначала необходимо определить, для каких изображений нужно проводить дополнительную фильтрацию, а для каких нет, т. е. необходимо классифицировать изображения [8].

Исходя из этого были сформулированы следующие задачи:

- разработать алгоритм классификации изображений;
- изучить различные методы фильтрации изображений;
- разработать алгоритм фильтрации изображений для обнаружения границ трубы и пилотной линии.

В результате данная работа была разделена на два этапа.

ПЕРВЫЙ ЭТАП – СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Так как изображение состоит из фона и пилотной линии, то проводить классификацию лучше всего по признаку яркости. А поскольку различные участки изображения имеют разную яркость, то целесообразно в этом случае использовать средневзвешенное её значение.

Для определения этого значения используется формула нахождения среднего арифметического взвешенного (1):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} = \frac{\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n}, \quad (1)$$

где $x_1, \dots, x_n$ – значения яркости пикселей изображения;

$\omega_1, \dots, \omega_n$ – количество пикселей определённой яркости на изображении.

Перед созданием алгоритма классификации изображений были определены параметры разделения изображений. Для этого были проанализированы 828 изображений с видеопотока камеры, установленной на реально действующей установке, и построены гистограммы яркости. По гистограммам были определены минимальное, среднее и максимальное значения средневзвешенной яркости в случае наличия или отсутствия пилотной линии. Для создания эталонной выборки факт наличия линии определялся экспертом. Благодаря этому была определена минимальная яркость, ниже которой система однозначно не может найти линию.

Таблица – Полученные границы диапазонов средневзвешенной яркости

	Коэффициент средневзвешенной яркости		
	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
Линия не распознана	16,8141	19,7901	26,1877
Линия распознана	19,3061	43,4154	70,3071

Далее была разработана классификация по принципу дерева решений, где все изображения были разделены на три класса: где линия точно есть, где её точно нет и «ошибочная» зона.

После чего был разработан алгоритм классификации на языке Python, который принимает поток изображений с видеокamеры, анализирует этот поток по значению средней взвешенной яркости и разделяет изображения на три класса: 1-й класс (значение средневзвешенной яркости меньше 19,3) – оператору приходит сообщение о том, что линии нет; 2-й класс (от 19,3 до 26,2) – изображения проходят дополнительную обработку, после чего отправляются на алгоритм распознавания линии; 3-й класс (больше 26,2) – изображения сразу же отправляются на алгоритм распознавания линии.

ВТОРОЙ ЭТАП – РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для выделения краев трубы относительно фона и краев пилотной линии можно использовать предобработку изображения с применением различных способов обнаружения границ объекта на изображении. В ходе работы были изучены некоторые из них.

ПЕРВЫЙ СПОСОБ – ПРИМЕНЕНИЕ ПОРОГОВОЙ БИНАРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Пороговая бинаризация (Thresholding) – это способ обнаружения объекта на изображении, основанный на выборе порога по яркости. Суть этого метода заключается в разделении изображения на светлый объект (foreground) и тёмный фон (background), где объект – это совокупность тех пикселей, яркость которых превышает порог ($L > T$), а фон – совокупность остальных пикселей, яркость которых ниже порога [9].

При этом для данного способа обнаружения объектов существуют различные методы выбора порога яркости, например, использование гистограммы (метод Оцу, метод треугольника и метод минимума), вычисление отклонений значения серого пикселя и его окрестности (метод Ниблэка (threshold_niblack) и метод Саувола (threshold_sauvola)), вычисление пороговой маски изображения на основе локальной окрестности пикселя (локальный метод (threshold_local)) и т. д.

После применения различных методов пороговой бинаризации изображений были выявлены три из них, показавших оптимальный результат:

- threshold_niblack (image, window_size = 25, k = 0.3), где image – исходное изображение, window_size – размер окна, k – параметр, показывающий влияние стандартного отклонения серого пикселя и его окрестности;

- threshold_sauvola (image, window_size = 25, k = 0.3, c = 50)), где image – исходное изображение, window_size – размер окна, k – параметр, показывающий влияние стандартного отклонения серого пикселя и его окрестности, r – динамический диапазон стандартного отклонения;

- threshold_local (image, block_size = 45), где image – исходное изображение, block_size – размер окрестности пикселя для вычисления порогового значения (нечётное число).

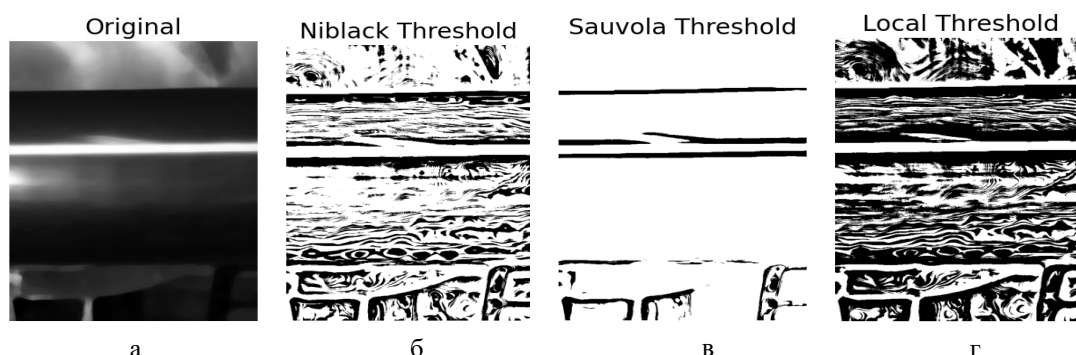


Рисунок 2 – Обработка изображения при помощи трех пороговых методов бинаризации, показавших оптимальный результат: а) оригинальное изображение; б) метод Ниблэка; в) метод Саувола; г) локальный метод

Исходя из результатов обработки изображений, можно сделать вывод, что данные три метода пороговой бинаризации очень хорошо определяют границы пилотной линии, а также верхнюю границу трубы. Нижняя граница различима, однако не всегда четкая (это связано с тем, что с трубы стекают капли воды, поэтому изображение нижней границы может быть не совсем четким, это касается и других двух способов обнаружения границ объекта, представленных здесь). Однако у этих пороговых методов бинаризации есть существенный недостаток – это большое количество шумов. Очень сильно это заметно на изображениях, прошедших через локальный метод и метод Ниблэка. У метода Саувола практически нет шумов около верхней границы трубы и границ пилотной линии, однако при этом затруднено определение нижней границы трубы из-за шумов, образовавшихся рядом с ней.

ВТОРОЙ СПОСОБ – ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЕРАТОРА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ КРАЁВ CANNY EDGE DETECTOR

Данный оператор использует алгоритм, который состоит из четырёх основных этапов: сглаживание входного изображения и удаление шума, вычисление градиентов, «немаксимальное подавление» и порог гистерезиса [10]. Для сглаживания входного изображения и удаления шума применяется функция Гаусса, описываемая формулой (2):

$$g(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (2)$$

где параметры a, b, c выражаются через среднеквадратичное отклонение σ и математическое ожидание μ (формула (3)):

$$a = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}, b = \mu, c = \sigma. \quad (3)$$

Для вычисления градиентов применяется оператор Собеля, который использует ядра 3×3 , с которыми сворачивает исходное изображение для вычисления приближённых значений производных по горизонтали и вертикали. Пусть A – это исходное изображение, а G_x и G_y – два изображения, на которых каждая точка содержит приближённые производные по x и y . Они вычисляются по формуле (4) [11]:

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \text{ и } G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A, \quad (4)$$

где знак «*» обозначает двумерную операцию свертки.

В результате в каждой точке изображения приближённое значение величины градиента, а также направление градиента можно вычислить путём использования полученных приближённых значений производных, используя формулы (5) и (6) [11]:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (5)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (6)$$

«Немаксимальное подавление»: на этом этапе алгоритм отслеживает вершины гребней функции, которые поднимаются максимально, и устанавливает в ноль пиксели, которые находятся не на вершине гребня, в результате чего получается тонкая линия [10].

Порог гистерезиса – это два порога t_1 и t_2 так, что $t_1 > t_2$. Этот порог работает следующим образом: если градиент точки ниже нижнего порога t_2 , то эта точка обнуляется; если градиент точки выше верхнего порога t_1 , то эта точка сохраняется (эти точки образуют «видимые» рёбра на конечном изображении); если же градиент точки находится между этими двумя порогами, то эти точки создают рёбра, находящиеся в «серой зоне». Если какое-либо из этих рёбер соединено с «видимым» ребром, то оно также считается ребром, а если нет – то они обнуляются [10].

Данный оператор применялся с использованием следующих значений параметров: `cv2.Canny(image, 18, 35)`, где `image` – исходное изображение, 18 – значение нижнего порога гистерезиса, 35 – значение верхнего порога гистерезиса. Результат работы данного способа обнаружения границ изображений представлен ниже (рис. 3).

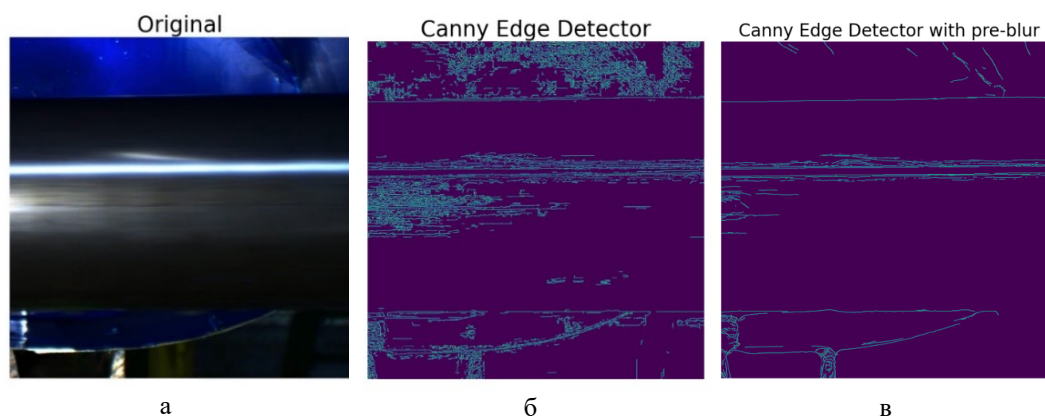


Рисунок 3 – Обработка изображения при помощи оператора детектирования краёв: а) оригинальное изображение; б) Canny Edge Detector; в) Canny Edge Detector с предварительным размытием

Результаты обработки изображения при помощи алгоритма Canny Edge Detector по некоторым важным параметрам намного лучше, чем у первого фильтра. Так, в этом случае у нас значительно меньше шума, а если перед использованием этого фильтра применить размытие изображения (`cv2.medianBlur(image, 35)`, где `image` – исходное изображение, 35 – значение размера ядра свёртки), то большинство образовавшегося шума убирается, и необходимые линии становятся ещё более заметными. Кроме того, при обработке изображения при помощи данного фильтра нижняя граница трубы определяется лучше.

ТРЕТИЙ СПОСОБ – ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРА ГАБОРА

Фильтр Габора – это линейный электронный фильтр, импульсная переходная характеристика которого определяется в виде гармонической функции, помноженной на гауссиан (формула (7)):

$$g(x, y; \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right), \quad (7)$$

где $x' = x \cos \theta + y \sin \theta$;

$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$;

x, y – координаты пикселя на изображении;

λ – длина волны множителя-косинуса;

θ – определяет ориентацию нормали параллельных полос функции Габора в градусах;

ψ – сдвиг фаз в градусах;

γ – коэффициент сжатия, характеризующий эллиптичность функции Габора [12].

Изменяя значение θ , мы изменяем пространственную направленность фильтра, из-за чего получаются разные результаты при других неизменных параметрах. Для нашего случая наиболее эффективным был горизонтальный фильтр Габора, поскольку все линии, которые нам необходимо определить также являются горизонтальными.

Данный фильтр применялся с использованием следующих значений параметров.

Для горизонтального фильтра Габора:

`g_kernel_h = cv2.getGaborKernel((21, 21), 3, 0, np.pi/2, 5, 5, 0, 1, 0, ktype = cv2.CV_32F)`, где (21, 21) – размер ядра фильтра Габора, 3, 0 – значение стандартного отклонения функции Гаусса, $\pi/2$ – значение ориентации нормали к параллельным полосам, 5, 5 – значение длины волны синусоидального коэффициента, 0, 1 – значение пространственного соотношения сторон, 0 – смещение фазы, `ktype` – тип и диапазон значений, которые может содержать каждый пиксель в ядре фильтра Габора;

`filtered_img_h = cv2.filter2D(image, cv2.CV_8UC3, g_kernel_h)`, где `image` – исходное изображение, `cv2.CV_8UC3` – тип получаемого изображения, `g_kernel_h` – фильтр, применяемый для данного изображения.

Вертикальный фильтр Габора будет отличаться от горизонтального только значениями некоторых параметров, а именно: значение ориентации нормали к параллельным полосам для него будет равно $\pi/2$. Результаты работы данного фильтра представлены ниже (рис. 4).

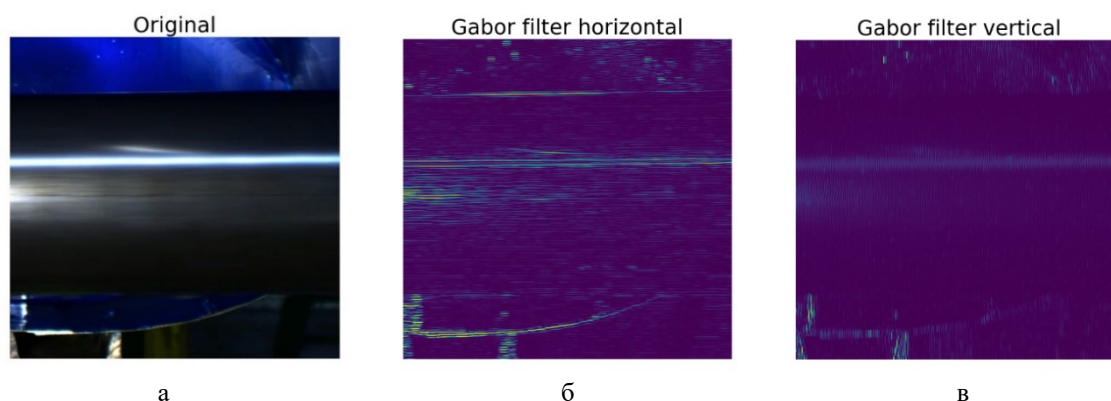


Рисунок 4 – Обработка изображения при помощи фильтра Габора: а) оригинальное изображение; б) применение горизонтального фильтра Габора; в) применение вертикального фильтра Габора

В результате анализа данного фильтра выявился ряд недостатков: в нём много шумов и плохо определена линия нижней границы трубы. Кроме того, он не всегда хорошо определяет верхнюю границу трубы.

Чтобы определить оптимальный способ обнаружения границ объекта на изображении для дальнейшего внедрения из представленных выше, был проведён анализ эффективности работы каждого из них. Для этого использовалась формула (8) и видеопоток с общим числом кадров, равным 162.

$$E_w = \frac{d_e}{d_c} \times 100\%, \quad (8)$$

где E_w – эффективность работы алгоритма в процентах;

d_e – количество ошибочных определений границ трубы;

d_c – количество правильных определений границ трубы.

В результате метод пороговой бинаризации показал худший результат, поскольку ни на одном из обработанных им изображений одновременно верхняя и нижняя граница правильно определены не были. Кроме того, было очень тяжело подобрать оптимальные параметры для определения границ трубы.

У оператора Canny Edge Detector отношение количества ошибочных определений границ трубы к правильным составило 12,2 %, что является лучшим результатом среди представленных способов определения границ объекта на изображении. И для верхней, и для нижней границы трубы это отношение составило 6,1 %.

Для фильтра Габор отношение количества ошибочных определений границ трубы к правильным составило 48,2 %, т. е. фильтр Габор ошибается примерно в каждом втором изображении из ста. При этом правильное определение для нижней границы трубы составило 0,9 %, а для верхней границы – 47,3 %.

После проведенного анализа для дальнейшего внедрения было решено использовать в создаваемой программе оператор детектирования краев Canny Edge Detector (программа разрабатывалась на языке Python).

При этом для избавления от шума и улучшения обнаружения необходимых линий было добавлено медианное размытие, в котором центральный пиксель изображения заменяется медианой всех пикселей в области ядра. Для этой же цели цветовое пространство исходного разноцветного изображения мы преобразуем в цветовое пространство одного определённого цвета.

Для определения положения пилотной линии относительно середины трубы необходимо определить положение краёв трубы, центра пилотной линии и центра трубы и уже непосредственно определить, расстояние между пилотной линией и центром трубы. Поэтому в программу были также добавлены алгоритмы для вычисления и отображения соответствующих линий, а также отображение значения расстояния между центром пилотной линии и центром трубы. Более подробно данные этапы описаны ниже.

После того как изображение прошло через оператор детектирования краёв Canny Edge Detector, все линии на полученном изображении обнаруживаются при помощи алгоритма обнаружения линий (Line Segment Detector). Далее все линии сортируются по длине и ширине: те линии, длина которых больше 110 пикселей, а ширина меньше 5 пикселей, остаются и добавляются в список линий, а остальные линии на изображении, которые не удовлетворяют заданным условиям, удаляются.

После чего рисуется линия, показывающая верхнюю границу трубы. Поскольку на изображениях начало координат находится в левом верхнем углу, поэтому для определения верхней границы ищутся минимальные значения по вертикали координаты точки начала каждой линии и составляется список минимальных значений. Далее из списка минимальных значений вычисляется среднее минимальное значение по вертикали координаты точки начала каждой линии, после чего определяется абсолютная разность между минимальным значением и средним минимальным значением. Если значение этой разности меньше 60 пикселей, то линия будет рисоваться по минимальному значению по вертикали координаты точки начала каждой линии. Если же среднее минимальное значение меньше 155 пикселей, то линия будет рисоваться по среднему минимальному значению, иначе для определения величины по вертикали координаты точки начала каждой линии, применяется формула (9):

$$y = \frac{a+b}{3}, \quad (9)$$

где y – значение по вертикали координаты точки начала каждой линии;

a – минимальное значение y ;

b – абсолютная разница между средним минимальным и минимальным значениями y .

Эти условия для рисования линии, в том числе и для рисования других линий (где используются аналогичные условия), нужны для того, чтобы избавиться от скачков линии на изображении.

Аналогичным способом рисуется линия, показывающая нижнюю границу трубы, однако вместо минимальных значений используются максимальные значения. Здесь условия для рисования линий следующие: если значение разницы между средним максимальным и максимальным значениями по вертикали координаты точки начала каждой линии меньше 30 пикселей, то линия будет рисоваться по максимальному значению, иначе – по среднему максимальному значению.

Далее определяется положение пилотной линии. Поскольку пилотная линия на изображении достаточно широкая, то оптимальным методом для определения её положения является нахождение положения её средней линии. Для этого определяется положение границ пилотной линии, которые выявились при помощи Canny Edge Detector.

Однако, несмотря на то, что шум был по максимуму удалён из изображения, получаемого с помощью Canny Edge Detector, он всё равно присутствует. Поэтому здесь добавляется условие для значения координаты по вертикали точки начала каждой линии. Линии, удовлетворяющие условиям, считаются принадлежащими пилотной линии. Далее определяются следующие значения: минимальные и средние минимальные значения, максимальные и средние максимальные значения по вертикали координаты точки начала каждой линии для пилотной линии. После чего определяется значение координаты по вертикали точки начала средней пилотной линии, и эта линия рисуется.

Далее нужно найти среднюю линию самой трубы. Она определяется аналогично средней пилотной линии.

Последний этап – это определение расстояния между средней пилотной линией и средней линией трубы. Оно находится как разность этих двух значений. После чего выводятся на экран все линии и значение этого расстояния, а также график зависимости изменения этого расстояния от времени.

После создания программы для комфортного ее использования работниками предприятия был создан удобный и интуитивно-понятный интерфейс, реализованный с помощью фреймворка Kivy и дополнения KivyMD на языке Python. На начальном экране пользователю предлагается выбрать видеопоток, с которого необходимо произвести анализ изображений трубы. После того как пользователь указал видеопоток и импортировал его в программу, производится переход на экран обработки видеопотока. Изображение этого экрана представлено на рисунке 5.

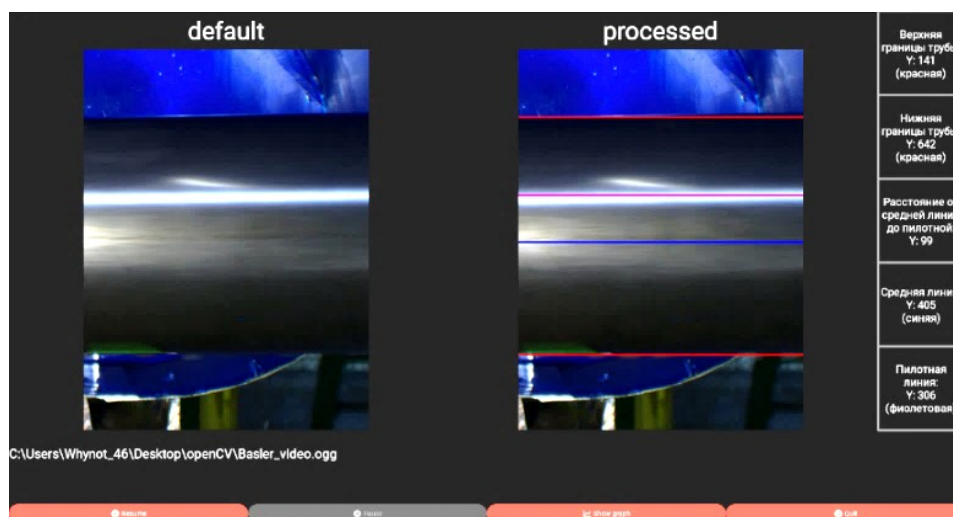


Рисунок 5 – Интерфейс работы программы дополнительной фильтрации изображения

На экране слева отображается видеопоток импортированного файла до обработки, а справа – уже проанализированный поток, где указаны линии границ трубы (красные линии), линия середины трубы (синяя линия) и линия середины пилотной линии (фиолетовая линия), а также расстояние между пилотной линией и средней линией трубы. Справа от обработанного видеопотока отображается значение координаты по вертикали (Y) для каждой проведённой линии с точкой начала отсчёта в верхнем левом углу изображения и значение расстояния между пилотной и средней линиями трубы.

Ниже вывода видеопотока расположены функциональные кнопки, отвечающие за остановку /возобновление изображения, показ графика зависимости расстояния между пилотной и средней линиями трубы от времени и кнопка выхода из программы.

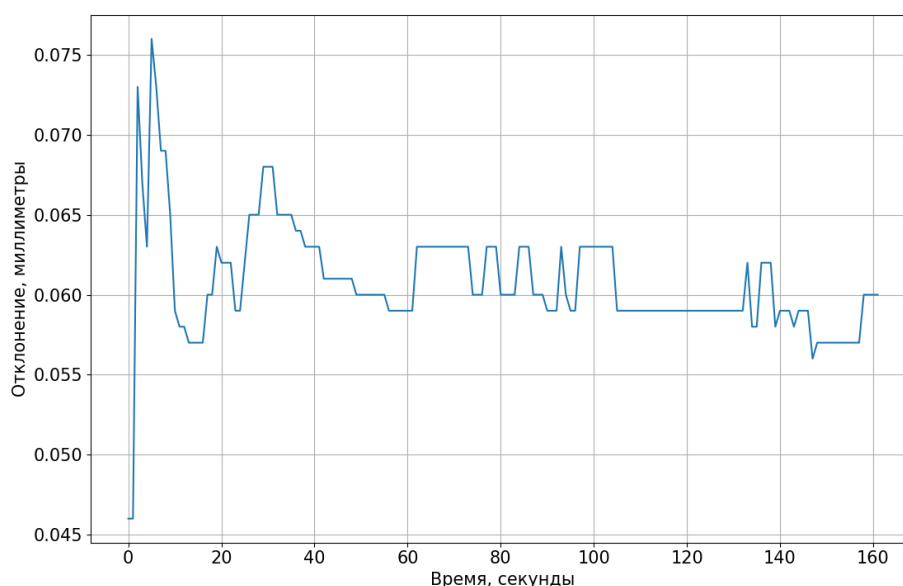


Рисунок 6 – Окно графика зависимости расстояния между пилотной и средней линиями трубы от времени

При анализе графика было получено среднее значение отклонения, т. е. расстояния между пилотной и средней линиями труб. Для 162 изображений оно составило приблизительно 0,0608 миллиметров.

Также для более удобной разработки и дальнейшего комфортного модифицирования программы исходный код был разбит на отдельные файлы:

- файл интерфейса программы (в нём описываются действия всех функциональных кнопок, открытие/импортирование видеопотока, составление графика и т. д.);
- файл алгоритма обработки видеопотока (в нём расположен сам алгоритм обработки изображения, описанный выше);
- файл, связывающий алгоритм программы с её интерфейсом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы приведён анализ возможности применения компьютерного зрения для задачи обнаружения пилотной линии на трубе. Рассмотрен способ классификации изображений на основе средневзвешенной яркости изображения и результаты его применения. Для выделения краёв трубы относительно фона и краёв пилотной линии возможно использовать предобработку изображения с применением пороговых фильтров, а затем определять на полученном бинаризованном фрагменте прямые линии. Проанализированы три способа обнаружения границ объекта на изображении (метод пороговой бинаризации, оператор обнаружения краёв Canny Edge Detector и фильтр Габора), а также алгоритм выделения прямых линий Line Segment Detector. Проведена оценка качества работы каждого из способов при решении поставленной задачи. В результате оценки метод пороговой бинаризации показал худший результат, поскольку ни на одном из обработанных им изображений одновременно верхняя и нижняя граница правильно определены не были. Кроме того, было очень тяжело подобрать оптимальные параметры для определения границ трубы. У оператора Canny Edge Detector отношение количества ошибочных определений границ трубы к правильным составило 12,2 %, что является лучшим результатом среди представленных способов определения границ объекта на изображении. И для верхней, и для нижней границы трубы это отношение составило 6,1 %. Для фильтра Габора отношение количества ошибочных определений границ трубы к правильным составило 48,2 %, т. е. фильтр Габора ошибается примерно в каждом втором изображении из ста. При этом правильное определение для нижней границы трубы составило 0,9 %, а для верхней границы – 47,3 %. Поэтому для дальнейшего внедрения было решено использовать оператор обнаружения краёв Canny Edge Detector. Была разработана программа, написанная на языке Python с использованием библиотеки OpenCV и интерфейса Kivy.

Список источников

1. Holm, E. A. Overview: Computer Vision and Machine Learning for Microstructural Characterization and Analysis / E. A. Holm, R. Cohn, N. Gao et al. // *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*. – 2020. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-020-06008-4>.
2. David, J. Usage of Real Time Machine Vision in Rolling Mill / J. David, P. Švec, V. Pasker, R. Garzinová // *Sustainability*. – 2021. – № 13. – P. 3851. – URL: <https://doi.org/10.3390/su13073851>.
3. Legrand, A.-C. Machine vision systems in metallurgy industry / A.-C. Legrand, P. Suzeau, E. Renier, F. Truchetet, P. Gorria and F. Meriaudeau // *Journal of Electronic Imaging*. – 2001. – URL: https://www.researchgate.net/publication/220050699_Machine_vision_systems_in_the_metallurgy_industry.
4. Karlsson, J. F. Visual detection of personal protective equipment & safety gear on industry workers / J. Karlsson, F. Strand. – Halmstad, 2022.
5. Dunajko, M. Computer vision solutions in the metallurgical industry / M. Dunajko // *NeuroSYS: AI & IT Solutions for business*. – URL: <https://neurosys.com/blog/computer-vision-metallurgical-industry>.
6. РД 153-34.1-003-01. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования. – Введ. 01.01.2002. – Москва : ПИО ОБТ, 2002. – 199 с.
7. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс ; пер. с англ. Л. И. Рубанова, П. А. Чочиа ; науч. ред. П. А. Чочиа. – Москва : Техносфера, 2012. – 1104 с.
8. Методы компьютерной обработки изображений / М. В. Гашников, Н. И. Глузов, Н. Ю. Ильясова и др. ; под ред. В. А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
9. Обнаружение объектов методом Оцу // Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/post/112079/>.
10. Данилов, В. #3 Нейронные сети для начинающих. Работа с изображениями в OpenCV. Алгоритм Canny Edge Detector / В. Данилов // Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/company/ruvds/blog/694994/>.
11. Оператор Собеля // GitHub: Let's build from here. – URL: https://github.com/TryOpenCV/sobel/blob/master/Sobel_Laplacian.md.
12. Локальная термообработка сварного шва // MyLeksii.ru. – URL: <https://myleksii.ru/2-129981.html>.

References

1. Holm, E. A., Cohn, R., Gao, N. et al. Overview: Computer Vision and Machine Learning for Microstructural Characterization and Analysis. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11661-020-06008-4>.

2. David, J., Švec, P., Pasker, V., Garzinová, R. Usage of Real Time Machine Vision in Rolling Mill. *Sustainability*, 2021, no. 13, p. 3851. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13073851>.
3. Legrand, A.-C., Suzeau, P., Renier, E., Truchetet, F., Gorria, P. and Meriaudeau, F. Machine vision systems in metallurgy industry. *Journal of Electronic Imaging*, 2001. Available at: https://www.researchgate.net/publication/220050699_Machine_vision_systems_in_the_metallurgy_industry.
4. Karlsson, J., Strand, F. *Visual detection of personal protective equipment & safety gear on industry workers*. – Halmstad, 2022.
5. Dunajko, M. Computer vision solutions in the metallurgical industry. *NeuroSYS: AI & IT Solutions for business*. Available at: <https://neurosys.com/blog/computer-vision-metallurgical-industry>.
6. RD 153-34.1-003-01. *Svarka, termoobrabotka i kontrol trubnykh sistem kotlov i truboprovodov pri montazhe i remonte energeticheskogo oborudovaniya* [RD 153-34.1-003-01. Welding, heat treatment and control of pipe systems of boilers and pipelines during installation and repair of power equipment]. Introduction. 01.01.2002. Moscow, PIO OBT, 2002. 199 p.
7. Gonzalez, R., Woods, R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow, Technosfera Publ., 2012. 1104 p.
8. Gashnikov, N. I. Glumov, N. Y. Ilyasova, M. V. et al. *Metody kompyuternoy obrabotki izobrazheniy* [Methods of computer image processing]. 2nd ed., rev. Moscow, FIZMATLIT, 2003. 784 p.
9. Obnaruzheniye obyektov metodom Otsu [Object detection by the Ocu method]. *Habr* [Habr]. Available at: <https://habr.com/ru/post/112079/>.
10. Danilov, V. #3 Neyronnyye seti dlya nachinayushchikh. Rabota s izobrazheniyami v OpenCV. Algoritm Canny Edge Detector [#3 Neural networks for beginners. Working with images in OpenCV. Canny Edge Detector Algorithm]. *Habr* [Habr]. Available at: <https://habr.com/ru/company/ruvds/blog/694994/>.
11. Operator Sobelya [Sobel's operator]. *GitHub: Let's build from here*. Available at: https://github.com/Try-OpenCV/sobel/blob/master/Sobel_Laplacian.md.
12. Lokalnaya termoobrabotka svarnogo shva [Local heat treatment of the weld]. *MyLektsii.ru*. Available at: <https://mylektsii.ru/2-129981.html>.

Статья поступила в редакцию 03.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 27.04.2023.

The article was submitted 03.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 27.04.2023.

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРИВЫЧЕК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ**

Кузнецова Валентина Юрьевна, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,
доцент кафедры цифровых технологий и кибербезопасности, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelia@bk.ru

Гелагаев Тимур Магомедович, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,
магистрант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8467-4807>, e-mail: tgelagaev@yandex.ru

Досмухамедов Булат Рамильевич, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,
доцент кафедры цифровых технологий и кибербезопасности, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2614-370X>, e-mail: bulat@doslab.ru

В статье рассматривается задача формализации процесса формирования привычки. Авторами отмечено, что, несмотря на продолжительную историю изучения темы привычек и интерес к ней со стороны сразу нескольких областей знаний, процесс формирования привычки по-прежнему остаётся недоисследованным. Авторами статьи предлагается схема формирования привычек, состоящая из нескольких одновременно применяемых компонентов: сигнал, повторение, мотивация и окружение, в то время как два последних компонента представляют собой совокупность ряда факторов. Отмечено, что для формирования привычек возможно применение мобильных приложений. В рамках данных выводов проведён анализ рынка для выявления тех продуктов, которые могли быть использованы для решения поставленной задачи. В качестве выводов на основании полученных результатов предложена собственная схема формализации и автоматизации процесса формирования привычек, представлены соответствующие диаграммы.

Ключевые слова: формализация процесса формирования привычки, прецедентный подход, формирование привычки, мобильное приложение

HABITS FORMATION METHODOLOGY USING A MOBILE APP

Kuznetsova Valentina Yu., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Digital Technologies and Cybersecurity, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelia@bk.ru

Gelagaev Timur M., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

undergraduate student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8467-4807>, e-mail: tgelagaev@yandex.ru

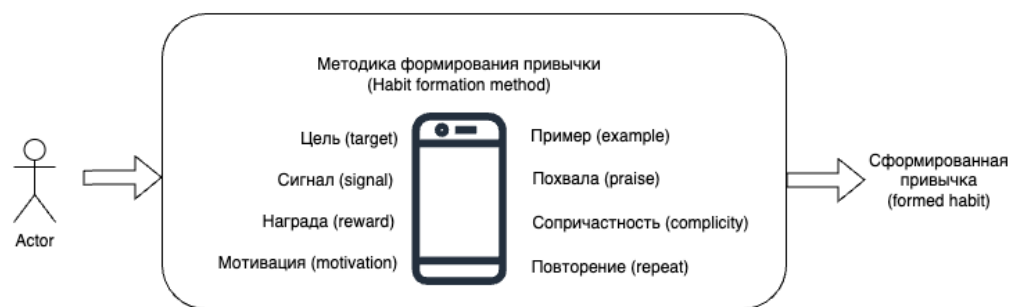
Dosmukhamedov Bulat R., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Associate Professor, Department of Digital Technologies and Cybersecurity, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2614-370X>, e-mail: bulat@doslab.ru

The article deals with the task of formalizing the process of habit formation. The authors noted that despite the long history of studying the topic of habits and interest in it from several fields of knowledge at once, the process of habit formation remains underexplored. The authors of the article propose a habit formation scheme that consists of several simultaneously applied components: signal, repetition, motivation, and environment, while the last two components are a combination of a number of factors. It is noted that for the formation of habits it is possible to use mobile applications. As part of these conclusions, an analysis of the market was carried out to identify those products that could be used to solve the problem. As conclusions, based on the results obtained, an own scheme for formalizing and automating the process of habit formation is proposed, and the corresponding diagrams are presented.

Keywords: formalization of the habit formation process, case-based approach, habit formation, mobile application

Graphical annotation (Графическая аннотация)

**ВВЕДЕНИЕ**

Двадцать первый век – век информационных технологий, век, когда всё развивается настолько стремительно, что многие люди просто не успевают, не развиваются, находятся в состоянии стагнации. С возрастом всё только усугубляется, не хватает ни сил, ни времени на поддержание того уровня знаний, физической формы, финансовой грамотности и т. п. Также остро встаёт вопрос формирования положительных привычек, так как известно, что отрицательные привычки у человека формируются достаточно быстро, даже, можно сказать, неконтролируемо, в то время как привычки, направленные на развитие, оздоровление и другие позитивные аспекты жизнедеятельности, зачастую не так легко сформировать.

Современные программные продукты стали не только привычным спутником для развлечения и решения рабочих задач, но и всё чаще направлены для повышения личной эффективности, создания «новой лучшей версии себя». Ярким примером выступают мобильные приложения в области фитнес-тренинга, трекеры здоровья, to-do листы, счётчики калорий. Каждое из них основано на общеизвестном методе, который был автоматизирован для того, чтобы улучшить жизнь пользователя. В связи с этим становится целесообразным изучить, существуют ли формализованные методы формирования привычек и оценить возможность автоматизации этих методов.

ПРИВЫЧКИ И ИХ ФОРМИРОВАНИЕ

Привычка – сложившийся стереотип поведения, осуществление которого в определённой ситуации приобретает для индивида характер потребности, которые побуждают повторно совершать какие-либо действия, поступки.

При формировании привычки неоднократно выполняется какое-либо действие, чрезвычайно важное значение имеет вызываемое самим осуществлением этого действия приятное эмоциональное переживание, так как оно является «усвоенным...», которое стало автоматическим и совершается без усилий».

Несмотря на продолжительную историю изучения темы привычек и интерес к ней со стороны сразу нескольких областей знаний, процесс формирования привычки по-прежнему остаётся недоисследованным. Патентный поиск и анализ библиографических указателей показал, что научное сообщество в большей степени интересовалось вопросом формирования привычек в рамках здоровьесберегающих технологий и правил здорового образа жизни [4–7, 9].

Несмотря на дефицит гипотез полных механизмов, можно выделить важные факторы и признаки привычки, которые необходимо учесть при разработке алгоритма её формирования. Прежде всего, это повторяемость деятельности. Привычка формируется путём многократного выполнения одного и того же действия в тех же самых или очень схожих обстоятельствах. Вопрос, насколько схожи должны быть эти обстоятельства, остаётся на сегодняшний день открытым, потому что в естественных условиях формирование привычки наблюдать чрезвычайно сложно, а лабораторные эксперименты почти всегда проводят при неизменных условиях [1–3].

Новые привычки формируются через обучение. Любое действие начинается с мотивации, когда человек пытается понять, зачем ему нужна та или иная привычка. Сначала он знакомится с тем, как другие делают то же самое. Затем начинает повторять всё то, что увидел у других людей. Таким образом формируется цель привычки и положительный пример окружения для подражания.

Также Чарльз Дахигг в своей книге «Сила привычки. Почему мы живём и работаем именно так, а не иначе» пишет, что привычка состоит из связки: сигнал – рутина (повторения) – вознаграждение [10]. По его теории, для активации привычки мозг должен получить определённый знак или сигнал. А после выполнения этого действия он ждёт вознаграждения – это могут быть как положительные эмоции, так и физическое вознаграждение, например, какое-то приобретение. Кроме того, очень важно, чтобы кто-нибудь из окружающих также формировал ту же самую привычку. Ярким примером выступает совместный бег по утрам или попытки сесть на диету с понедельника с другом

или подругой. Окружение, помимо вышеуказанных воздействий, может положительно влиять в том числе и моральной поддержкой в виде похвалы, которая также способствует формированию привычки.

Таким образом, схему формирования привычки можно представить следующим образом (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема формирования привычки

При этом Нир Эяль и Райан Хувер, авторы публицистического издания «На крючке. Как создавать продукты, формирующие привычки», приводят данные исследования от 2008 года о том, что одной из распространённых привычек является использование мобильного телефона: в среднем 150 раз в день люди проверяют свои телефоны [11]. Аналогичные исследования о привычках использования смартфоном приводят и российские исследователи [8].

Таким образом, идея использования мобильных устройств для формирования привычек может быть жизнеспособной в силу того, что само по себе применение в обыденной жизни мобильных устройств выступает достаточно устоявшейся привычкой, в том числе с целью «убить время».

АНАЛИЗ РЫНКА МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРИВЫЧЕК

Мобильные приложения для формирования привычек существуют в достаточно большом количестве на всех популярных платформах, а именно Android, iOS, Harmony OS (эта операционная система поддерживает Android-приложения). Пользователю нужно зайти в магазин приложений найти подходящее приложение и установить его себе на устройство. Большинство таких приложений условно бесплатные (бесплатное использование с ограниченным функционалом) и предлагают расширенный функционал за дополнительную плату (премиум-подписки). Как правило, приложения используют стандартную простую схему формирования привычки – напоминать о том, что нужно произвести действие с определённой частотой. В некоторых приложениях существуют дополнительные системы мотиваций выполнять поставленные перед человеком задачи, а именно соревнования между пользователями сервиса, бонусы, внутренняя валюта с внутренним магазином и т. п.

В связи с тем, что в рамках данной статьи были выявлены дополнительные факторы формирования привычек, возникла необходимость проверить, учитывают ли имеющиеся на рынке мобильные приложения эти факторы и в какой мере (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ мобильных приложений для формирования привычек

Название Факторы	SingularityApp	Habit	Loop	Brite	TickTick	Productive
Цель	+	+	+	+	+	+
Вознаграждение	–	–	+	–	–	–
Пример	–	–	–	–	–	+
Похвала	+	+	–	–	–	–
Поддержка	–	–	–	–	–	+
Повторения	+	+	+	+	+	+
Статистика	+	+	+	+	+	+
Кол-во привычек	3	3	любое	3	5	5
Уведомления	+	3	+	+	+	+
Доступно на iOS и Android	+	iOS	Android	+	+	+

Проанализировав наиболее распространенные приложения, было определено, что ни одно из приложений не удовлетворяет схеме формирования привычки, приведённой ранее: большинство приложений включают в себя функционал формулировки цели, позволяют реализовывать функцию повторения действий и уведомлений о необходимости совершения действий. Важно отметить, что в приложениях отсутствует информация о том, сколько раз потребуется повторять действия для формирования привычки либо пользователь должен задать её вручную.

Таким образом, наглядно видно, что готового решения, которое может, на наш взгляд, в полной мере способствовать формированию привычек, отсутствует на мировом рынке мобильных приложений. Для его разработки требуется сформулировать методику формирования привычки для дальнейшей её автоматизации.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА

В рамках исследования было принято решение разработать мобильное приложение, которое будет мотивировать пользователя к формированию полезных привычек. В первую очередь, будет реализован метод расчёта необходимого количества дней для формирования привычек в зависимости от уровня готовности пользователя к формированию привычек.

Предполагается, что при регистрации помимо основных демографических данных пользователь будет проходить опрос, который будет содержать в себе информацию о том, есть ли у пользователя опыт формирования положительных привычек, имеются ли «вредные привычки», занимается ли пользователь физической нагрузкой и умственным трудом, употребляет ли на постоянной основе витамины группы В – все эти данные, в совокупности с возрастом пользователя влияют на скорость образования новых нейронных связей, и, как следствие, на период формирования привычки.

Также важно учесть, что каждая привычка может иметь различный срок формирования. Проще говоря, какая-то привычка формируется легче, какая-то – сложнее, поэтому у каждой привычки должен быть учтен так называемый «уровень сложности» – Level. Наиболее удобной шкалой оценки уровня сложности привычки является трехбалльная шкала – «лёгкая», «средняя» и «сложная» привычка.

В формализованном виде время, отведённое на формирование привычки, будет представлено следующим образом:

$$Time \sim (Old + Exp + Level + Vitamins + Physical + Mental + Habits ...), \quad (1)$$

где *Time* – время формирования привычки;

Old – возраст;

Exp – опыт формирования положительных привычек;

Habits – наличие вредных привычек;

Vitamins – факт приема витаминов группы В;

Physical – факт занятий спортом;

Mental – факт наличие частого умственного труда;

Level – уровень сложности привычки.

Чем больше отрицательных параметров выявляются при первичном сборе данных, тем больше задаётся срок для формирования каждой привычки. Однако каждый пользователь должен иметь возможность задать при необходимости сроки формирования привычки самостоятельно.

Сбор демографических данных помогает также в соответствии с имеющейся базой данных пользователей путём метода прецедентов сформировать рекомендации по поводу тех привычек, которые формируют себе пользователи того же пола, возраста, семейного положения и т. д. Также сохраняется возможность создать привычку вручную.

Использование в методике прецедентного подхода с поиском «ближайшего соседа» позволяет представить мобильное приложение как рекомендательную систему, которая будет учитывать демографические и поведенческие характеристики пользователей, тем самым формируя факторы окружения – поддержку и сопричастность, которые положительно влияют на формирование привычки.

Выбор частоты повторений в сутки будет зависеть от типа привычки. За пользователем также сохраняется возможность вручную изменять частоту повторений в сутки с уведомлениями на мобильное устройство.

Для успешного формирования привычки будет реализована игрофикация и соревновательность: за каждый успешный выполненный этап пользователю будут начисляться баллы, которые позволят соревноваться с другими пользователями, а также обменивать баллы на поощрения с магазинами или сервисами-партнерами. Также каждый пользователь сможет создавать команду друзей и формировать привычку совместно.

При необходимости пользователь может остановить формирование привычки. Для этого периодически собирается обратная связь о результатах.

В виде схемы на рисунке 2 представлена последовательность действий для добавления новой привычки.

На рисунке 3 приведена диаграмма вариантов использования мобильного приложения.

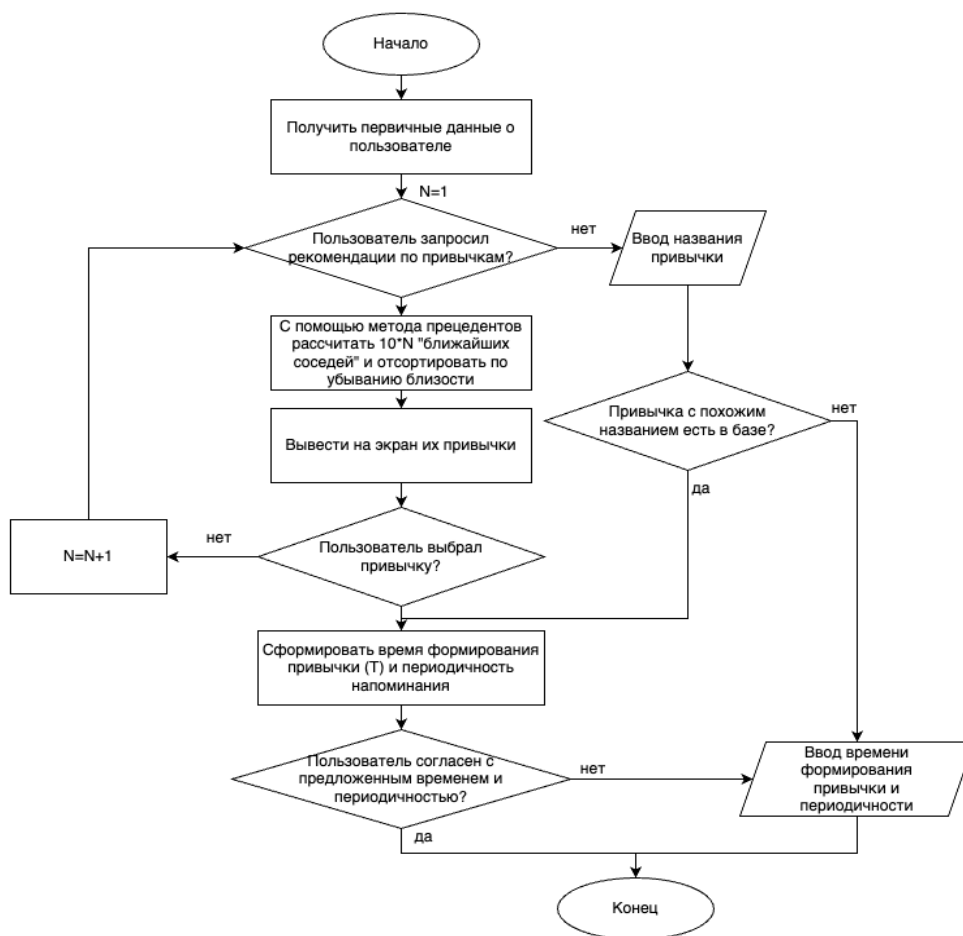


Рисунок 2 – Схема добавления новой привычки в мобильное приложение

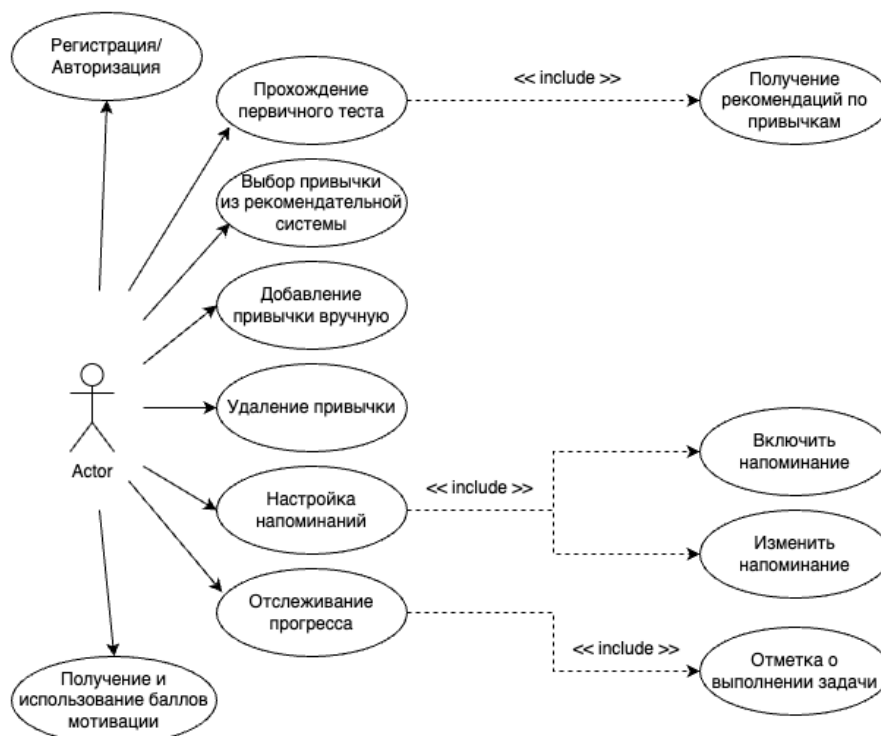


Рисунок 3 – Диаграмма вариантов использования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс формирования привычки, несмотря на продолжительную историю изучения и интерес к нему со стороны сразу нескольких областей знаний, по-прежнему остаётся недоисследованным и неформализованным. Это связано со специфическими особенностями учёта слабоформализуемых характеристик индивидуумов, таких как склонность характера, наличие умственного и физического труда и пр.

Авторами предпринята попытка формализовать процесс формирования привычки с учетом нескольких одновременно применяемых компонентов: сигнал, повторение, мотивация и окружение, в то время как два последних компонента представляют собой совокупность ряда факторов, что легло в основу предлагаемой в рамках данной статьи методики. Использование в методике прецедентного подхода с поиском «ближайшего соседа» позволяет представить мобильное приложение как рекомендательную систему, которая будет учитывать демографические и поведенческие характеристики пользователей, тем самым формируя факторы окружения – поддержку и сопричастность, которые положительно влияют на формирование привычки.

Ключевым аспектом методики является оценка индивидуального времени формирования каждой привычки у пользователя с учётом его слабоформализуемых характеристик, которые собираются с помощью опроса при регистрации в приложении.

Список источников

1. Истратов, В. А. Разработка компьютерного алгоритма формирования привычки / В. А. Истратов // Искусственные общества. – 2019. – Т. 14, № 4. – С. 11.
2. Истратов, В. А. О развитии компьютерного алгоритма формирования привычки / В. А. Истратов // Искусственные общества. – 2020. – Т. 15, № 3. – С. 7.
3. Истратов, В. А. Компьютерный алгоритм формирования привычки у человека / В. А. Истратов // Экономика и математические методы. – 2021. – Т. 57, № 2. – С. 135–147.
4. Ладодо, К. С. Формирование правильного пищевого поведения / К. С. Ладодо и др. // Лечащий врач. – 2009. – № 1. – С. 54–57.
5. Матушкина, Ю. А. Формирование мотивации к здоровому образу жизни у обучающихся общеобразовательных учебных заведений / Ю. А. Матушкина, Е. Н. Иванова, Ю. А. Федулова // Наука и образование. – 2020. – Т. 3, № 2.
6. Ошкина, А. А. Психологические основы формирования основ здорового образа жизни у дошкольников / А. А. Ошкина // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Педагогика, психология. – 2012. – № 4. – С. 219–222.
7. Тимофеева, Л. Л. Формирование культуры безопасности. Планирование образовательной деятельности в старшей группе : метод. пособие / Л. Л. Тимофеева и др. – Санкт-Петербург : Детство-Пресс, 2015.
8. Токарева, Т. Н. Формирование привычки к IT-продуктам / Т. Н. Токарева // Студенческий форум. – 2020. – № 33. – С. 19–20.
9. Ухлебина, П. Г. Формирование полезных привычек у младших школьников как проблема информационного общества / П. Г. Ухлебина // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 5–1. – С. 68–69.
10. Дахигг, Ч. Сила привычки. Почему мы живем и работаем именно так, а не иначе / Ч. Дахигг. – Карьера Пресс, 2016. – 416 с.
11. Эяль, Н. На крючке: Как создавать продукты, формирующие привычки / Н. Эяль. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2017.
12. Belic, Dusan, IntoMobile Thursday, February 9th, and 2012 at 12:50 AM. “Tomi Ahonen: Average Users Looks at Their Phone 150 Times a Day!” IntoMobile / Belic Dusan. – URL: <http://www.intomobile.com/2012/02/09/tomi-ahonen-average-users-lookstheir-phone-150-times-day/> (дата обращения: 19.07.2023).
13. Tobias, R. Changing behavior by memory aids: a social psychological model of prospective memory and habit development tested with dynamic field data / R. Tobias // Psychological review. – 2009. – Vol. 116, № 2. – P. 408.
14. Wang, H. On formalization / H. Wang // Computation, Logic, Philosophy: A Collection of Essays. – 1990. – P. 3–12.

References

1. Istratov, V. A. Razrabotka kompyuternogo algoritma formirovaniya privyichki [Development of a computer algorithm for forming habits]. *Iskusstvennyye obshchestva* [Artistic Societies], 2019, vol. 14, no. 4, p. 11.
2. Istratov, V. A. O razvitii kompyuternogo algoritma formirovaniya privyichki [On the development of a computer algorithm for forming habits]. *Iskusstvennyye obshchestva* [Artistic Societies], 2020, vol. 15, no. 3, p. 7.
3. Istratov, V. A. Kompyuternyy algoritm formirovaniya privyichki u cheloveka [Computer algorithm for habit formation in humans]. *Ekonomika i matematicheskiye metody* [Economics and Mathematical Methods], 2021, vol. 57, no. 2, pp. 135–147.
4. Ladodo, K. S. et al. Formirovaniye pravilnogo pishchevogo povedeniya [Formation of correct eating behavior]. *Lechashchiy vrach* [Attending Physician], 2009, no. 1, pp. 54–57.
5. Matushkina, Yu. A., Ivanova, E. N., Fedulova, Yu. A. Formirovaniye motivatsii k zdorovomu obrazu zhizni u obuchayushchikhsya obshcheobrazovatelnykh uchebnykh zavedeniy [Formation of motivation for a healthy lifestyle in students of general educational institutions]. *Nauka i obrazovaniye* [Science and education], 2020, vol. 3, no. 2.

6. Oshkina, A. A. Psikhologicheskiye osnovy formirovaniya osnov zdorovogo obraza zhizni u doskolnikov [Psychological foundations for the formation of the foundations of a healthy lifestyle among preschoolers]. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pedagogika, psikhologiya* [Vector of Science of Togliatti State University. Series: Pedagogy, Psychology], 2012, no. 4, pp. 219–222.
7. Timofeeva, L. L. et al. *Formirovaniye kultury bezopasnosti. Planirovaniye obrazovatelnoy deyatel'nosti v starshey grupe : metod. posobiye* [Formation of safety culture. Planning of educational activities in the senior group: method. allowance]. St. Petersburg, Childhood-Press, 2015.
8. Tokareva, T. N. Formirovaniye privyichki k IT-produktam [Forming a habit to it-products]. *Studencheskiy forum* [Student Forum], 2020, no. 33, pp. 19–20.
9. Ukhlebina, P. G. Formirovaniye poleznykh privyechek u mladshikh shkolnikov kak problema informatsionnogo obshchestva [Formation of useful habits in younger schoolchildren as a problem of the information society]. *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik* [International Student Scientific Bulletin], 2016, no. 5–1, pp. 68–69.
10. Dahigg, C. *Sila privyichki. Pochemu my zhivem i rabotayem imenno tak, a ne inache* [The power of habit. Why do we live and work this way and not otherwise]. Career Press, 2016. 416 p.
11. Eyal, N. *Na kryuchke: Kak sozdavat produkty, formiruyushchiye privyichki* [Hooked: How to create habit-forming products]. Moscow, Mann, Ivanov i Ferber Publ., 2017.
12. Belic, Dusan. *IntoMobile Thursday, February 9th, and 2012 at 12:50 AM. "Tomi Ahonen: Average Users Looks at Their Phone 150 Times a Day!"* IntoMobile. Available at: <http://www.intomobile.com/2012/02/09/tomi-ahonen-average-users-lookstheir-phone-150-times-day/> (accessed 19.07.2023).
13. Tobias, R. Changing behavior by memory aids: a social psychological model of prospective memory and habit development tested with dynamic field data. *Psychological review*, 2009, vol. 116, no. 2, p. 408.
14. Wang, H. On formalization. *Computation, Logic, Philosophy: A Collection of Essays*, 1990, pp. 3–12.

Статья поступила в редакцию 27.08.2023; одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 29.08.2023.

The article was submitted 27.08.2023; approved after reviewing 29.08.2023; accepted for publication 29.08.2023.

УДК 004.912

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ПЕРЕВОДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРЕВОДЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КЛАССИЧЕСКОГО КИТАЙСКОГО ЯЗЫКА ВЭНЬЯНЬ НА ДРУГИЕ ЯЗЫКИ

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

доктор технических наук, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры информационной безопасности, ORCID: 0000_0001_9058_123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Мухамедова Дания Ринатовна, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

магистрант, ORCID: 0009_0003_5662_0305, e-mail: dania.krit29@gmail.com

Китай занимает лидерские позиции во многих областях и остаётся главнейшим экономическим и политическим партнером РФ, в связи с чем китайский язык становится всё более популярным. В основе многих китайских диалектов лежит письменный литературный язык вэньянь. Оценка переводов с данного языка на русский язык с помощью метрики BLEU, сделанных с помощью сервисов Google Translate, Яндекс переводчик, DeepL Переводчик и ChatGPT показал, что современные сервисы плохо справляются с данной задачей. Исходя из этого, целью написания данной работы стал анализ методов машинного перевода и рассмотрение возможных подходов, которые могли бы лечь в основу создания системы машинного перевода с классического литературного языка вэньянь на другие языки (например, русский).

Ключевые слова: машинный перевод, вэньянь, сервисы машинного перевода, алгоритмы машинного перевода, BLEU

ANALYSIS OF MACHINE TRANSLATION METHODS TO DEVELOP A TRANSLATION SYSTEM FROM WENYANG CLASSIC CHINESE TO OTHER LANGUAGES

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

Doct. Sci. (Engineering), Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID: 0000_0001_9058_123X, e-mail: aim_agtu@mail.ru

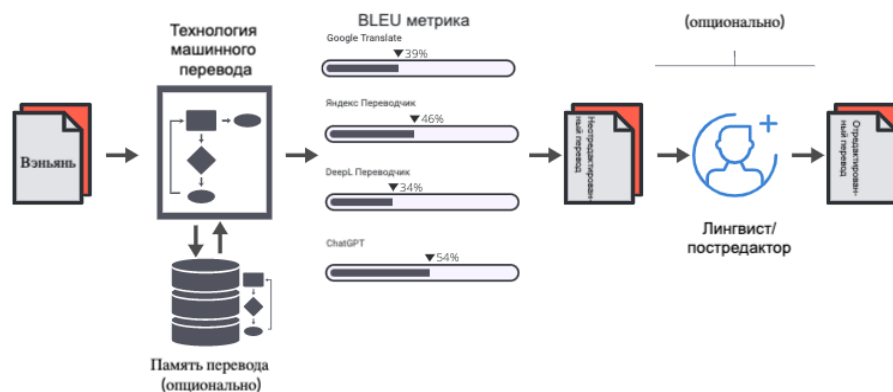
Mukhamedova Dania R., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

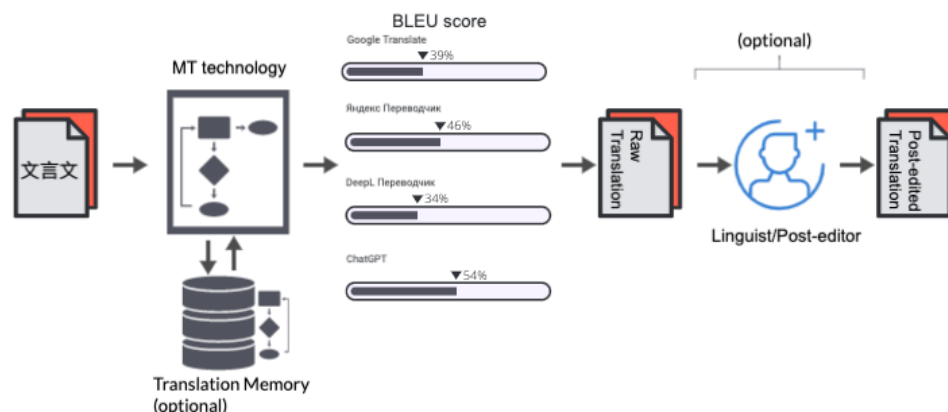
master's student, ORCID: 0009_0003_5662_0305, e-mail: dania.krit29@gmail.com

China is a leader in many areas and remains the RF's most important economic and political partner, making the Chinese language increasingly popular. Many Chinese dialects are based on the written literary language Wenyan. An evaluation of translations from this language into Russian using the BLEU metric, made with Google Translate, Yandex Translator, DeepL Translate and ChatGPT has shown that the current services do not do a good job. With this in mind, the purpose of this paper was to analyze machine translation methods and consider possible approaches that could be the basis for a machine translation system from classical literary Wenyan to other languages (e.g., Russian).

Keywords: Machine translation, Wenyan, machine translation services, machine translation algorithms, BLEU

Graphical annotation (Графическая аннотация)





ВВЕДЕНИЕ

Китай занимает важное место в сфере экономического, военно-технического и образовательного сотрудничества с Россией, что является определяющим фактором в распространении китайских диалектов и культуры на территории РФ. В настоящее время существует довольно большое количество переводческих онлайн-сервисов, которые справляются с переводом большинства китайских диалектов, однако главная трудность заключается в переводе вэньяня.

Вэньянь (文言 «культурная речь») – это нормативный традиционный китайский литературный язык, история которого началась складываться на основе классических канонических, философских и исторических текстов V–III вв. до н. э. Вэньянь считался нормой литературного языка, который в значительной степени отличался от разговорного и был непонятен на слух. В VII–IX вв. на вэньяне писались тексты в жанре повествовательной прозы, которые были доступны только для высших сословий общества, имеющих образование, а также философские новеллы. До XX в. на вэньяне оформлялись документы, литературные произведения, философская, медицинская, научная литература. Вэньянь был известен далеко за пределами Китая – различные его модификации использовались в литературе Японии, Кореи и Вьетнама.

Основные отличия вэньяня от современных китайских диалектов:

- 1) лаконичность изложения мысли, так как вэньянь стремится к максимальной краткости (например, опущение местоимений);
- 2) преобладание односложных слов;
- 3) отсутствие аффиксации;
- 4) отсутствие знаков препинания;
- 5) использование опоры на контекст;
- 6) использование большого количества служебных слов.

Китайский язык имеет древнюю историю, поэтому языковая культура Китая во многом основана на древних китайских текстах. Важность перевода текстов вэньяня заключается в количестве письменных источников, многие из которых остаются непереверждёнными в силу затруднительности процесса перевода и малом количестве специалистов-переводчиков. К тому же существенно присутствие вэньяня в различных аспектах современных китайских диалектов. Большое количество современных текстов содержат в себе элементы вэньяня для краткости и выразительности (служебные слова, устойчивые словосочетания, фразеологизмы). Употребление в письме и речи фразеологизмов из древнекитайских трактатов является показателем образованности и начитанности, и зачастую их можно встретить в научных статьях, литературных произведениях, политических речах.

На сегодняшний день не удалось добиться серьёзного успеха в машинном переводе текстов вэньяня в силу недостаточности исследований в области машинного перевода вэньяня. Основными проблемами, с которыми сталкиваются системы машинного перевода, являются полисемантизм словарных единиц и необходимость адекватного выбора предполагаемых значений этих единиц. К тому же слова из вэньяня могут принимать любую синтаксическую роль в предложении, и их вариант перевода определяется исходя из синтаксической роли и контекста [1]. По этим причинам уровень человеческого перевода считается эталонным. Однако перевод текстов классического китайского языка на русский является сложной задачей, требующей глубоких знаний и понимания исторического контекста. Таким образом является актуальной задача создания системы машинного перевода для упрощения процесса перевода текстов вэньяня. Однако решение данной задачи сложно реализуемо с применением классических подходов.

Исходя из этого, целью написания данной работы стало рассмотрение возможных подходов, которые могли бы лечь в основу создания системы машинного перевода с классического литературного языка взънянь на другие языки (например, русский).

МЕТОДЫ МАШИННОГО ПЕРЕВОДА

Дадим определение такому понятию, как «машинный перевод». Под этим термином понимается область научных исследований, связанных с переводческими системами и непосредственно перевод текстов. В данной статье мы будем обращаться ко второму определению данного термина, которое уже имеет устоявшееся определение. Машинный перевод (МП) – это процесс перевода письменных текстов с одного естественного языка на другой с помощью специальной компьютерной программы [2]. Если текст переводится при помощи компьютера, то речь идёт об автоматизированном переводе (CAT, computer-assisted translation) [3]. В данной работе не был рассмотрен автоматизированный перевод.

Впервые концепция МП была предложена Уорреном Уивером в 1947 году, всего через год после того, как был разработан первый компьютер. С тех пор МП считается одной из самых сложных задач в области обработки естественного языка (NLP).

Два основных подхода к построению алгоритмов МП – алгоритм, основанный на правилах (RBMT), и алгоритм, основанный на статистике (SMT). В самом начале системы МП в основном разрабатывались для военных целей. В 1954 г. Джорджтаунский университет в сотрудничестве с International Business Machines Corporation (IBM) впервые успешно завершил эксперимент по МП с использованием компьютера IBM-701, что послужило активному финансированию данной сферы. В 1965 г. исследователи NLP провели первую международную конференцию по компьютерной лингвистике, посвященную технологиям МП, основанным на правилах. В 1978 г. SYSTRAN, одна из первых компаний, занимающихся МП, запустила коммерческую систему перевода, которая в то время была одним из самых известных примеров коммерчески успешной системы, основанной на правилах. Google использовал сервис SYSTRAN вплоть до 2007 г.

Технологии машинного перевода на основе правил используют лингвистические и переводные словари и написанные вручную семантические, морфологические и синтаксические правила каждого языка для перевода текстов исходного языка (ИЯ) в эквивалентные по смыслу тексты на переводящем языке (ПЯ). Однако написание правил вручную требует много ресурсов. Данный подход считается традиционным и использовался вплоть до 2000-х.

Существует три типа перевода на основе правил:

1. Трансферная система (Transfer-based MT) анализирует исходное предложение, а затем собирает предложение на другом языке, основываясь на грамматике.
2. Системы пословного перевода (Dictionary-based MT) дословно переводит все слова, из-за чего считается самым примитивным методом.
3. Интерлингвистические системы (Interlingua-based MT) применяют язык-посредник (интерлингва).

В большинстве случаев используется трансферная система. Рассмотрим её подробнее. Предложения разбиваются на слова и знаки препинания. Полученные элементы называются токенами, а сам процесс разбиения предложения на элементы – токенизацией (рис. 1). Токены анализируются, чтобы выяснить их роль в предложении (часть речи и грамматические значения). Далее необходимо определить связи между токенами и объединить их в группы. При этом часто используется база памяти переводов (translation memory) – сохранённые переводы сегментов текста, выполненные человеком (идиомы, фразеологизмы, словосочетания или целые предложения), которые помогают улучшить качество переводов.

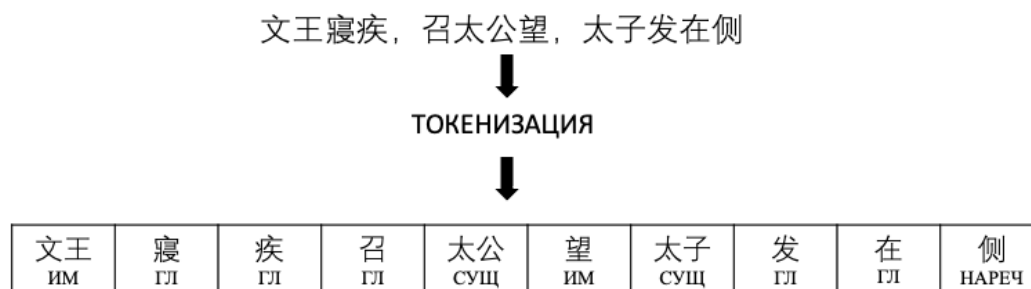


Рисунок 1 – Токенизация

ТЕХНОЛОГИИ МАШИННОГО ПЕРЕВОДА, ОСНОВАННЫЕ НА СТАТИСТИКЕ

Благодаря появлению двуязычных корпусов с 2000-х гг. доминирующим подходом в сфере МП стал алгоритм, основанный на статистике (SMT), который был предложен в 1990 г. [4]. В основе идеи SMT машины изучают знания о переводе из большого количества данных вместо того, чтобы полагаться на людей-экспертов для написания правил. В 1999 г. исследователи провели летний семинар в Университете Джонса Хопкинса, на котором продемонстрировали пять моделей IBM и выпустили инструментарий SMT под названием Egypt [5], благодаря которому системы SMT стали доступнее. В 2003 г. были предложены методы SMT на основе фраз, которые повысили качество перевода [6]. Также были выпущены системы с открытым исходным кодом, такие как «Pharaoh» и его обновленная версия «Moses» [7], что значительно способствовало развитию алгоритмов и распространению SMT. В 2006 г. Google запустил службу интернет-перевода, основанную на методах SMT на основе фраз. В последующие годы другие крупные компании, такие как Microsoft и Baidu, также запустили услуги по переводу.

Принцип работы SMT заключается в нахождении вероятности (1). На вход подается предложение x , задача машинного перевода найти предложение y , которое с большей вероятностью является переводом предложения x :

$$\arg \max_y p(y|x), \quad (1)$$

где $\arg \max_y$ – аргумент максимизации от y ;

$p(y|x)$ – вероятность перевода y предложения x .

Языковая модель – способ вычисления вероятности для всех теоретически возможных предложений языка. Существует большое множество моделей, для которых требуется корпус – большой набор текстов. Пусть v – это множество словоформ корпуса, из которых состоят предложения. Вероятность слова x_n при условии, что перед ним стоят слова $x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1}$ находится по следующей формуле (2):

$$P(x_n | x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1}), \quad (2)$$

где x_n – слово, вероятность которого находится;

$x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1}$ – цепочка слов, предшествующих x_n .

Зная вероятности для каждого слова, можно посчитать вероятность любого предложения, перемножив условные вероятности каждого отдельного слова (3):

$$P(x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1}) = P(x_1) \cdot P(x_2|x_1) \cdot P(x_3|x_1, x_2) \dots \cdot P(x_n|x_1, x_2 \dots x_{n-1}). \quad (3)$$

Вероятность цепочки слов $x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1}$ равна вероятности появления x_1 , умноженной на вероятность появления x_2 при условии, что ему предшествует x_1 , умноженной на вероятность появления x_3 при условии, что ему предшествует x_1, x_2 и т. д.

SMT основан на двуязычных корпусах текстов, из чего вытекает главный недостаток статистического машинного перевода – это недостаточное количество языковых корпусов. При недостаточном объеме входных данных перевод становится неточным и некорректным. При этом принцип работы статистического машинного перевода заключается в подстановке предложений и словосочетаний. В настоящее время используется более совершенная технология машинного перевода, которая способна анализировать структуру предложения.

Технологии нейронного машинного перевода являются самым современным подходом в МП. Нейронные сети привнесли большие изменения в различные области от компьютерного зрения до искусственного интеллекта в видеоиграх. Благодаря их достижениям системы МП начали использовать нейронные методы глубокого обучения, которые заменили предыдущие подходы.

Большое количество обучающих данных и возросшая вычислительная мощность компьютеров позволяют моделям нейронного машинного перевода (NMT) достигнуть большей адекватности и в результате значительно сократить отставание от качества человеческого перевода. В 2014 г. И. Суцкевер [8] предложил end-to-end модели нейронных сетей и официально использовал термин «нейронный машинный перевод». Основная идея NMT состоит в том, чтобы преобразовать исходный язык в семантическое векторное представление, а затем сгенерировать перевод, используя механизм внимания.

Типичная модель NMT состоит из двух компонентов: энкодера, который отображает исходный текст в последовательность векторов и декодера, который производит перевод на другой язык. Процесс перевода при помощи модели NMT схож с человеческим переводом – модель сначала «читает» исходный текст целиком, а затем генерирует предложение на другом языке слово за словом, основываясь на своем понимании предложения. В отличие от методов SMT, модель NMT не требует правил, разработанных человеком.

Типичная модель NMT строится на основе стандартной рекуррентной нейронной сети (RNN). Существует исходное предложение $x = \{x_1, x_2, \dots, x_{T_x}\}$, где T_x – длина исходного предложения x .

Энкодер RNN сжимает исходное предложение x в скрытые состояния $h = \{h_1, h_2, \dots, h_{T_x}\}$ следующим образом (4):

$$h_t = g(h_{t-1}, x_t, \theta), \quad (4)$$

где g – это функция активации нейросети;

h_t и x_t – скрытое состояние и исходный токен в момент времени t соответственно;

t – временной шаг;

θ – набор параметров модели.

В базовой модели энкодер принимает последнее скрытое состояние h_{T_x} как исходное предложение. После чего декодер RNN производит перевод следующим образом (5):

$$p(y|x) = \prod_{t=1}^{T_y} p(y_t | y_{<t}, c), \quad (5)$$

где $y = \{y_1, y_2, \dots, y_{T_y}\}$ – перевод исходного предложения;

$p(y|x)$ – вероятность перевода;

T_y – длина предложения y ;

c – вектор, сгенерированный из скрытых состояний h ;

y_t – переведённое слово;

$y_{<t} = \{y_1, y_2, \dots, y_{t-1}\}$ состоит из переведённых слов, которые уже были сгенерированы.

Следует отметить, что переводить большие объёмы текстов, используя одну модель, затруднительно. Таким образом, переводческие системы обычно используют гибридные методы, которые объединяют различные алгоритмы МП для повышения производительности и адекватности перевода.

СЕРВИСЫ МАШИННОГО ПЕРЕВОДА

Для рассматриваемой языковой пары существуют различные сервисы машинного перевода. В рамках данной работы были отобраны некоторые популярные переводческие сервисы: Google Translate, Яндекс Переводчик и DeepL Переводчик. Также перевод был выполнен с помощью чат-бота с искусственным интеллектом ChatGPT.

Чтобы оценить эффективность различных сервисов перевода текстов классического китайского языка на русский язык, был проведён эксперимент. Мы использовали четыре популярных онлайн-сервиса для перевода: Google Translate, Яндекс Переводчик, DeepL Переводчик и ChatGPT. Было проведено сравнение их переводов с эталонным переводом человека, а также оценивание с помощью метрики BLEU (Bilingual Evaluation Understudy), которая измеряет сходство между машинным переводом и переводом, сделанным человеком. Основная идея разработчиков метрики BLEU состоит в том, что чем лучше машинный перевод, тем больше он должен быть похож на человеческий [9]. Оценка BLEU варьируется от 0 до 1, при этом более высокая оценка указывает на лучшее качество перевода.

Для расчёта метрики BLEU сначала необходимо вычислить близость n -граммов между машинным переводом и эталонными переводами. Затем для каждого n -грамма вычисляется его точность (precision), определяемая как количество вхождений n -грамма в машинный перевод, деленное на общее количество n -граммов в машинном переводе. После чего для каждого эталонного перевода находится максимальное значение точности среди всех n -граммов, и эти значения усредняются для всех эталонных переводов. Наконец, производится вычисление геометрического среднего этих максимальных точностей.

Для начала рассмотрим более подробно технологии, которые применяют данные сервисы. NMT способен преодолеть многие трудности, возникающие при использовании традиционных методов, однако такие системы требуют больших вычислительных ресурсов как при обучении, так и при переводе. Кроме того, зачастую возникают проблемы с переводом редко встречающихся слов. Эти проблемы препятствуют использованию NMT в практических целях, когда необходима скорость и точность.

Система нейронного машинного перевода от Google (GNMT) пытается решить данные проблемы за счёт использования глубокого обучения. GNMT состоит из рекуррентной сети с 8 слоями декодера и 8 слоями энкодера, используя механизм внимания и остаточные нейронные сети. Энкодер преобразует исходное предложение в список векторов (по одному вектору на входной символ). Учитывая этот список векторов, декодер создаёт символы до тех пор, пока не будет создан специальный символ конца предложения. Энкодер и декодер связаны между собой через модуль внимания, который позволяет декодеру сосредоточиться на различных областях исходного предложения в процессе декодирования.

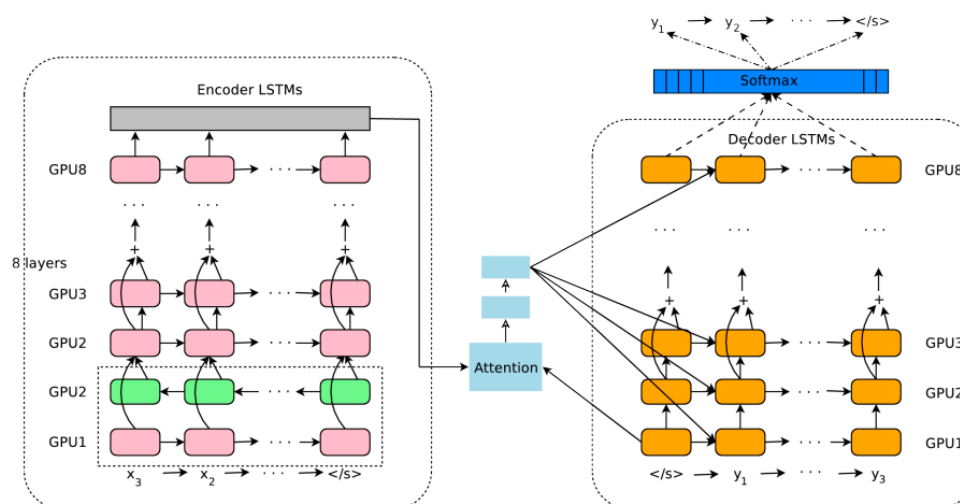


Рисунок 2 – Архитектура GNMT

Слева – сеть энкодера, справа – сеть декодера, посередине – модуль внимания. Нижний уровень кодировщика является двунаправленным: узлы, помеченные розовым цветом, собирают информацию слева направо, а узлы, помеченные зеленым цветом, собирают информацию справа налево. Остальные уровни кодировщика являются однонаправленными. Остаточные соединения начинаются с третьего снизу слоя в энкодере и декодере. Модель разделена на 8 уровней энкодера (1 двунаправленный уровень и 7 однонаправленных уровней) и 8 уровней декодера для ускорения обучения. GNMT размещён на 8 графических процессорах, которые, как правило, принадлежат одному хосту-компьютеру [10].

Сервис Яндекс Переводчика сочетает в себе нейронный и статистический подходы к МП, однако в рамках нашего исследования перевод с классического китайского языка на русский осуществляется при помощи статистического метода, так как гибридная система используется только с английского языка на русский [11].

В основе технологии переводчика DeepL лежит глубокое обучение, которое основывается на использовании нейронных сетей. Этот подход позволяет переводчику автоматически извлекать сложные языковые структуры из текста и переводить их на другой язык с высокой точностью [12].

DeepL использует свою собственную нейронную сеть, которая обучена на большом объёме параллельных текстов на различных языках. В отличие от других технологий машинного перевода, DeepL может анализировать полные предложения, а не только отдельные слова и фразы, что позволяет ему переводить текст более естественным и связным образом. Кроме того, DeepL использует технологию LSTM, что позволяет ему «запоминать» контекст и историю предложений, способствуя более точному переводу.

ChatGPT – это одна из новейших технологий машинного перевода, основанная на технологии глубокого обучения. Она использует модель GPT (Generative Pre-trained Transformer), которая была представлена в 2018 г. Generative Pre-trained Transformer (GPT) – это архитектура нейронной сети, которая используется для генерации текста, а также для выполнения задач обработки естественного языка. В процессе обучения модель обучается на огромном корпусе текстовых данных с помощью задачи маскированного языкового моделирования. В этом режиме GPT принимает на вход последовательность слов и пытается предсказать следующее слово в этой последовательности. В процессе обучения модель учится выделять зависимости между словами и понимать их контекст. GPT имеет несколько преимуществ перед другими моделями генерации текста. Он может генерировать связный текст, который имеет смысл и соответствует контексту. Это достигается благодаря механизму внимания, который позволяет модели фокусироваться на наиболее важных частях входных данных.

Для составления первичного представления о возможностях МП данных систем, выполняющих перевод с классического литературного языка эньянь на русский, сопоставим примеры переводов человеком и вышеперечисленными системами. В качестве источника используется отрывок из книги «*Водяная*» («Речные заводи»), представленный на китайском интернет-портале 华语网, а в качестве эталона – выполненный человеком перевод. Ниже представлены исходные данные и полученные результаты.

Исходный текст:

史进道：“既然如此，教人去县里买些果品案酒伺候。”

不觉中秋节至。

是日晴明得好。

史进当日分付家中庄客宰了一腔大羊，杀了百十个鸡鹅，准备下酒食筵宴。

看看天色晚来，少华山上朱武，陈达，杨春，三个头领分付小喽罗看守寨栅，只带三五个做伴，将了朴刀，各跨口腰刀，不骑鞍马，步行下山，迳来到史家庄上。

Эталонный перевод:

— Ну, раз гости придут, — сказал Ши Цзинь, — так пошли человека в город за вином и фруктами.

Вскоре наступил праздник осеннего урожая. В тот день погода была прекрасная, и Ши Цзинь приказал резать большого барана, более сотни кур и гусей и приготовить множество вина и яств для пира.

Вечером три предводителя, приказав своим удалцам охранять стан во время их отсутствия, вооружились мечами и в сопровождении человек пяти пешком спустились с горы и отправились в поместье Ши Цзиня.

Перевод Google Translate:

Ши Цзинь сказал: «Поскольку это так, научите людей ходить в графство, чтобы купить немного фруктов и вина для подачи».

Приближается Праздник середины осени.

Это солнечный день.

В тот же день Ши Цзинь заплатил экономке, чтобы она зарезала большую козу, зарезала сто или десять кур и гусей и приготовила пить, есть и пировать.

Посмотрите на приближающуюся ночь, на горе Шаогуа, Чжу Ву, Чэн Да, Ян Чунь, три вождя платят маленьким миньонам за охрану Чжайчжа, приведите только трех или пяти товарищей, держите Пу Дао, каждый с поясным ножом, а не верхом на коне, спуститься с горы и приехать в Шицзячжуан.

Перевод Яндекс Переводчика:

Ши Цзинь сказал: «В таком случае, научите людей ходить в округ, чтобы купить немного фруктов и вина для подачи».

Не думайте, что фестиваль середины осени должен.

Здесь солнечно и ярко.

В тот же день Ши Цзинь заплатил Чжуанке дома, чтобы тот зарезал большую овцу, зарезал сотню кур и гусей и приготовился к банкету с вином и едой.

Глядя на позднюю ночь, на горе Шаогуа, Чжу Ву, Чэн Да и Ян Чунь, три лидера горы Шаогуа, заплатили своим приспешникам, чтобы они охраняли часток, всего с тремя или пятью товарищами, взяли парковый нож, каждый оседлал поясной нож, не ездили верхом на лошади, спустился с горы, а потом пришел в Шицзячжуан.

Перевод DeepL Переводчика:

Ши Цзинь сказал: «В таком случае, научите кого-нибудь сходить в уезд и купить фрукты и вино, чтобы подать на стол».

Не успели мы оглянуться, как наступил Праздник середины осени.

День был ярким и солнечным.

Ши Цзинь велел своей семье зарезать большую овцу, забить сотню кур и гусей и приготовить пиршество с вином и едой.

Когда наступил поздний вечер, трем вождям, Чжу У, Чэн Да и Ян Чуню, было поручено охранять крепостную ограду, и они взяли с собой только трех-пятерых спутников.

Перевод ChatGPT:

Ши Цзиньдао: «Если так, то попроси кого-то купить фрукты и вино в графстве и подождать нас».

Незаметно наступил праздник середины осени.

В этот день было ясное и яркое небо.

В этот день Ши Цзинь распорядился, чтобы его слуги купили крупного ягненка и сотни кур и гусей, чтобы приготовить их на банкете.

Когда стало темнеть, на Шаогуашане остались только Чжу Ву, Чэн Да и Ян Чунь. Они поручили маленьким парням охранять заборы лагеря и сами, взяв лишь несколько человек, с ножами на поясах, спустились со склона горы пешком, не садясь на лошадей, и пришли в дом Ши.

Тексты, переведенные при помощи Google Translate и Яндекс Переводчика, не соответствуют оригинальному повествованию и содержат в себе большое количество логических ошибок. Google Translate предоставил более точный контекстуальный перевод, используя машинное обучение для анализа контекста переводимого текста, в то время как Яндекс Переводчик в большей степени выполнил пословный перевод, что объясняется использованием преимущественно статистического

подхода. Перевод чат-бота ChatGPT относительно других переводов более связный, однако не лишен неточностей и также далек от эталона.

В таблице показаны баллы метрики BLEU каждого сервиса. Как видно, чат-бот ChatGPT превзошёл службы онлайн-перевода, набрав 0,54 по сравнению с 0,39, 0,46 и 0,34 для Google Translate, Яндекс Переводчика и DeepL Переводчика соответственно (табл.).

Таблица – Оценки перевода сервисов согласно метрике BLEU

Сервис	Оценка метрики BLEU
Google Translate	0,39
Яндекс Переводчик	0,46
DeepL Переводчик	0,34
ChatGPT	0,54

Однако следует учитывать, что метрика BLEU не учитывает семантическую и грамматическую корректность перевода, поэтому иногда может давать неверные оценки качества. В любом случае эта метрика может быть полезна для сравнения качества различных переводов.

Тот факт, что перевод текстов с вэньяня на русский язык неадекватен по сравнению с эталонным переводом, сделанный человеком, можно сделать вывод, что требуется совершенствование методов МП вэньяня на русский язык, которые в дальнейшем могут быть положены в основу систем МП для данной пары языков.

Архитектура нейронного машинного перевода представлена двунаправленными рекуррентными нейронными сетями, которые позволяют запоминать и использовать контекст для перевода текстов вэньяня на русский язык, что является важной составляющей, так как лексемы вэньяня контекстозависимы и многозначны, то есть их перевод зависит от контекста. Механизм работы данных сетей основан на матричных вычислениях, которые позволяют строить вероятностные модели, которые намного точнее и сложнее статистических машинных переводчиков. Системы, основанные на правилах, в данном случае также неприменимы, так как структуры предложений вэньяня и русского языка различны. К тому же вэньянь претерпевал различные изменения и в зависимости от эпохи изменялась грамматика языка [13], что затруднило бы написание грамматических правил для данного языка. Резюмируя все вышесказанное, нейронный машинный перевод является оптимальным решением для перевода текстов вэньяня, так как данный подход компенсирует многие недостатки традиционных подходов. Тем не менее анализ показал, что, согласно оценкам метрики BLEU, современные переводческие сервисы далеки от эталонного человеческого перевода. Таким образом, учитывая всё вышесказанное, необходимо создать сервис машинного перевода, который будет основан на нейронных сетях и сможет эффективно переводить классический китайский язык вэньянь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с тем, что на сегодняшний день Китай занимает доминирующее положение во многих областях и является близким экономическим партнером РФ, общение на китайском языке становится всё более популярным. Возникает необходимость перевода с китайского языка большого объёма информации. Так как в основе многих китайских диалектов лежит вэньянь, а также имеется большое количество литературы, требуется адекватная система машинного перевода с вэньяня на русский язык. Обзор методов МП показал, что наиболее часто используются технологии на основе правил, статистики, а также с использованием нейронных сетей. Наиболее часто используемые на сегодняшний день сервисы Google Translate, Яндекс Переводчик, DeepL Переводчик и ChatGPT не позволяют получить адекватный перевод с вэньяня на русский язык. Данные сервисы получили следующие оценки: 0,39, 0,46, 0,34 и 0,54 соответственно. Этот факт доказывает то, что современные сервисы далеки от эталонного человеческого перевода и требуют совершенствования. Исходя из данного факта, задачи совершенствования методов перевода для данной пары языков и дальнейшая разработка соответствующего сервиса МП остаётся актуальной.

Список источников

1. Горелов, В. И. Лексикология китайского языка : учебное пособие / В. И. Горелов. – Москва : Просвещение, 1984. – 216 с.
2. Ясаревская, О. Н. К вопросу о машинном переводе: статистический машинный перевод / О. Н. Ясаревская // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 5 (33). – 139 с.
3. Митренина, О. В. Машинный перевод / О. В. Митренина, И. С. Николаев, Т. М. Ландо // Прикладная и компьютерная лингвистика. – Москва : URSS, 2017. – С. 156–189.
4. Brown, P. F. A statistical approach to machine translation / P. F. Brown, J. Cocke, S. A. Della Pietra, V. J. Della Pietra, F. Jelinek, J. D. Lafferty, et al. // Comput Linguist. – 1990. – № 16 (2). – P. 79–85.
5. Al-Onaizan, Y. Statistical machine translation: final report / Y. Al-Onaizan, J. Curin, M. Jahr, K. Knight, J. Lafferty, D. Melamed, et al. // JHU Workshop. – Baltimore, 1999. – P. 1–42.

6. Koehn, P. Statistical Phrase-Based Translation / P. Koehn, J. O. Franz, M. D. Och, D. Marcu // *Proceedings of the 2003 Human Language Technology Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*. – 2003. – P. 127–133.
7. Koehn, P. Moses: Open Source Toolkit for Statistical Machine Translation / P. Koehn, H. Hoang, A. Birch, C. Callison-Burch, M. Federico, N. Bertoldi, B. Cowan, W. Shen, et al. // *Proceedings of the 45th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics Companion. Vol. Proceedings of the Demo and Poster Sessions*. Prague: Association for Computational Linguistics. – 2007. – P. 177–180.
8. Sutskever, I. Sequence to sequence learning with neural networks / I. Sutskever, O. Vinyals, Q. V. Le // *Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems*. – Montreal, 2014. – P. 8–13.
9. Papineni, K. BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation (PDF) / K. Papineni, S. Roukos, T. Ward, W. J. Zhu // *ACL-2002: 40th Annual meeting of the Association for Computational Linguistics*. – P. 311–318.
10. Yonghui, W. Google's Neural Machine Translation System: Bridging the Gap between Human and Machine Translation / W. Yonghui, M. Schuster, Z. Chen, Q. V. Le, et al. – 2016. – 4 p.
11. Машинный перевод [Internet]. Компания Яндекс. [cited 17 Nov 2022]. – URL: <https://yandex.ru/company/technologies/translation/>.
12. A alternativa alemã ao Google Translate [Internet]. DW. [cited 1 Mar 2023]. – URL: <https://www.dw.com/pt-br/a-alternativa-alemã-ao-google-translate/a-46611851>.
13. Метелина, К. О. Особенности перевода вэньянизмов (на материале рассказов Лу Синя) / К. О. Метелина. – Томск : Издательство Томского университета, 2016. – 19 с.

References

1. Gorelov, V. I. *Leksikologiya kitayskogo yazyka : uchebnoye posobiye* [Lexicology of the Chinese language : textbook]. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1984. 216 p.
2. Yasarevskaya, O. N. K voprosu o mashinnom perevode: statisticheskiy mashinnyy perevod [On the issue of machine translation: statistical machine translation]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus], 2016, no. 5 (33). 139 p.
3. Mitrenina, O. V., Nikolaev, I. S., Lando, T. M. Mashinnyy perevod [Machine translation]. *Prikladnaya i kompyuternaya lingvistika* [Applied and Computational Linguistics]. Moscow, URSS, 2017, pp. 156–189.
4. Brown, P. F., Cocke, J., Della Pietra, S. A., Della Pietra, V. J., Jelinek, F., Lafferty, J. D., et al. A statistical approach to machine translation. *Comput Linguist.*, 1990, no. 16 (2), pp. 79–85.
5. Al-Onaizan, Y., Curin, J., Jahr, M., Knight, K., Lafferty, J., Melamed, D., et al. Statistical machine translation: final report. *JHU Workshop*. Baltimore, 1999, pp. 1–42.
6. Koehn, P., Franz, J. O., Och, M. D., Marcu, D. Statistical Phrase-Based Translation. *Proceedings of the 2003 Human Language Technology Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 2003, pp. 127–133.
7. Koehn, P., Hoang, H., Birch, A., Callison-Burch, C., Federico, M., Bertoldi, N., Cowan, B., Shen, W., et al. Moses: Open Source Toolkit for Statistical Machine Translation. *Proceedings of the 45th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics Companion. Vol. Proceedings of the Demo and Poster Sessions*. Prague: Association for Computational Linguistics, 2007, pp. 177–180.
8. Sutskever, I., Vinyals, O., Le, Q.V. Sequence to sequence learning with neural networks. *Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Montreal, 2014, pp. 8–13.
9. Papineni, K., Roukos, S., Ward, T., Zhu, W. J. BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation (PDF). *ACL-2002: 40th Annual meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp. 311–318.
10. Yonghui, W., Schuster, M., Chen, Z., Le, Q. V., et al. *Google's Neural Machine Translation System: Bridging the Gap between Human and Machine Translation*. 2016. 4 p.
11. *Mashinnyy perevod* [Internet]. *Kompaniya Yandeks* [Machine translation [Internet]. Company Yandex]. [cited Nov 17, 2022]. URL: <https://yandex.ru/company/technologies/translation/>.
12. *A alternativa alemã ao Google Translate* [Internet]. *D.W.* [cited Mar 1, 2023]. URL: <https://www.dw.com/pt-br/a-alternativa-alemã-ao-google-translate/a-46611851>.
13. Metelina, K. O. *Osobennosti perevoda venyanizmov (na materiale rasskazov Lu Sinya)* [Peculiarities of translation of Wenyanisms (based on the stories of Lu Xun)]. Tomsk, Tomsk University Publishing House, 2016. 19 p.

Статья поступила в редакцию 17.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 10.05.2023.

The article was submitted 17.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 10.05.2023.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

DOI 10.54398/20741707_2023_3_54
УДК 004.056

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Кулешова Елена Александровна, Юго-Западный государственный университет, 305004, Рос-сийская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,
кандидат технических наук, ORCID: 0000-0002-8270-564X, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru
Марухленко Анатолий Леонидович, Юго-Западный государственный университет, 305004, Рос-сийская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-3575-924X, e-mail: proxy33@mail.ru
Таныгин Максим Олегович, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,
доктор технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-4099-1414, e-mail: tanygin@yandex.ru
Косилова Елизавета Александровна, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,
бакалавр, ORCID: 0009-0000-5448-6796, e-mail: kosilovae5@gmail.com
Лаврова Елена Дмитриевна, Юго-Западный государственный университет, 305004, Рос-сий-ская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корпус Б,
бакалавр, ORCID: 0009-0004-3729-5479, e-mail: elav46@mail.ru

Цель работы заключается в анализе влияния значений гиперпараметров нейронных сетей на быстродействие системы обнаружения вторжений, а также на достоверность обнаружения случаев несанкционированного доступа в телекоммуникационных системах. При анализе параметров работы искусственной нейронной сети, обнаруживающей сетевые атаки на основе данных из открытой библиотеки MalwareTrainingSets, анализируются параметры работы функций активации, определяющие точность и достоверность обнаружения. В работе описан метод обнаружения вторжений на основе выбора эффективной функции активации с учётом особенностей данных, передаваемых в масштабе вычислительной сети и требований к обеспечению уровня информационной безопасности. Предложена математическая модель, обеспечивающая балансирование между скоростью и достоверностью распознавания сетевой атаки. В результате проведённых исследований синтезирован программный модуль, построенный на базе искусственной нейронной сети и функционирующий в режимах обучения, мониторинга и фильтрации потенциально вредоносного трафика. Особенностью предложенного решения является поддержка баланса между скоростью и достоверностью распознавания потенциально опасного трафика за счёт возможности динамического изменения параметров работы нейронной сети и использования расширенного блока настройки функции активации нейронной сети. Проведены экспериментальные исследования, позволяющие сформулировать критерии выбора параметров работы нейронной сети, обнаруживающей атаки в сетевом трафике.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, гиперпараметры, управление параметрами трафика сети, обнаружение вторжений, информационная безопасность

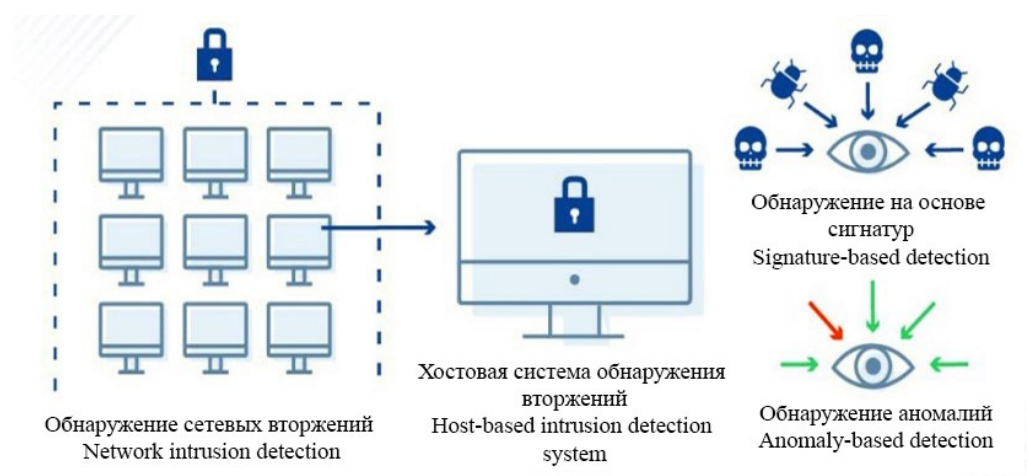
IMPLEMENTATION OF INTRUSION DETECTION SYSTEM USING A NEURAL NETWORK

Kuleshova Elena A., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0000-0002-8270-564X, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru
Marukhlenko Anatoly L., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-3575-924X, e-mail: proxy33@mail.ru
Tanygin Maxim O., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
Doct. Sci. (Engineering), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-4099-1414, e-mail: tanygin@yandex.ru
Kosilova Elizaveta A., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
bachelor, ORCID: 0009-0000-5448-6796, e-mail: kosilovae5@gmail.com
Lavrova Elena D., Southwest State University, building B, 19 Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
bachelor, ORCID: 0009-0004-3729-5479, e-mail: elav46@mail.ru

The purpose of the study is to analyze the influence of the values of hyperparameters of neural networks on the speed of the intrusion detection system, as well as on the reliability of detecting cases of unauthorized access in telecommunication systems. When analyzing the operation parameters of an artificial neural network that detects network attacks based on data from the open MalwareTrainingSets library, the operation parameters of activation functions are analyzed, which determine the accuracy and reliability of detection. The paper describes an intrusion detection method based on the choice of an effective activation function, taking into account the characteristics of data transmitted across a computer network and the requirements for ensuring the level of information security. A mathematical model is proposed that provides a balance between the speed and reliability of network attack recognition. As a result of the research, a software module was synthesized based on an artificial neural network and functioning in the training, monitoring and filtering modes of potentially malicious traffic. A feature of the proposed solution is to maintain a balance between the speed and reliability of detecting potentially dangerous traffic due to the possibility of dynamically changing the parameters of the neural network and using an advanced tuning unit for the neural network activation function. Experimental studies have been carried out to formulate criteria for choosing the parameters of a neural network that detects attacks in network traffic.

Keywords: artificial neural network, hyperparameters, network traffic parameters control, intrusion detection, information security

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Современное общество в значительной степени зависит от широкого спектра взаимосвязанных программных систем, которые используются в различных областях, таких как финансы, электроэнергетика, системы связи и транспорта [1, 2]. Благодаря внедрению интернет-технологий почти все финансовые, государственные и социальные секторы стали в значительной степени полагаться на сетевые информационные системы для обработки и хранения конфиденциальной информации [3, 4]. В результате эти системы стали основными объектами атак и вторжений злоумышленников [5, 6]. Атаки могут привести к сбоям в работе системы, нарушению работы сети, повреждению или краже данных, поэтому крайне важно обеспечить безопасность сети, отслеживая и обнаруживая сетевые атаки в режиме реального времени.

Система обнаружения вторжений (СОВ) – это инструмент, используемый для выявления несанкционированного и злонамеренного поведения путём наблюдения за сетевым трафиком и помощи сетевым администраторам в принятии соответствующих превентивных мер для защиты сетевой инфраструктуры и связанных узлов [7]. Большинство систем обнаружения вторжений можно разделить на две группы: системы обнаружения на основе аномалий и системы обнаружения на основе сигнатур [8].

Система обнаружения на основе аномалий изучает профиль нормального сетевого трафика и будет классифицировать заданные данные сетевого трафика как интрузивные или аномальные, если они отклоняются от профиля нормального трафика более чем на заранее определённый порог аномалии, что позволяет данным системам обнаруживать новые атаки. Однако значение порога аномалии оказывает существенное влияние на точность систем. Поиск оптимального значения порога аномалии является сложной задачей и во многих случаях требует ручной настройки. Система обнаружения вторжений на основе сигнатур идентифицирует интрузивный сетевой трафик путём сравнения заданных данных сетевого трафика с сигнатурами (например, последовательностью строк и регулярных выражений) известных атак. Эта категория СОВ наиболее часто используется в повседневной практике [9], поскольку большинство этих систем полагаются на базы знаний (т. е. заранее определённые наборы моделей и шаблонов атак), извлечённые из известных атак и системных

уязвимостей [10]. В большинстве случаев эксперты предметной области создают базы знаний вручную, что трудоёмко и влечёт за собой появление некоторых ошибок [11]. В отличие от СОВ на основе аномалий, эта группа СОВ может обнаруживать только те атаки, которые определены в базах знаний. Однако эти методы демонстрируют высокую степень точности и низкий уровень ложных срабатываний по сравнению с СОВ на основе аномалий [8, 12]. Одной из основных проблем при разработке этих систем является извлечение или определение сигнатуры известной атаки, которая может представлять различные варианты атаки. Кроме того, управление большой базой знаний о сигнатурах и сопоставление сигнатур с трафиком – это трудоёмкие и ресурсоёмкие задачи.

Распространение высокоскоростных сетей и быстро распространяющиеся угрозы создают дополнительные проблемы для современных СОВ, которые обнаруживают атаку, проверяя все данные сетевого трафика. Это означает, что СОВ сможет обнаружить атаку только после того, как она будет выполнена на атакуемой системе и, возможно, уже нанесла ей ущерб [13, 14]. Таким образом, раннее обнаружение атак (или вторжений) желательно в области кибербезопасности, чтобы предотвратить сетевые атаки до того, как они смогут причинить какой-либо дополнительный ущерб системе. Основываясь на ранних результатах классификации трафика, сетевой администратор может решить, следует ли остановить трафик и выдать аварийное сообщение или принять ответные меры.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения вышеперечисленных проблем предлагается использовать новые решения в информационной безопасности, которые основаны на технологии нейронных сетей, включая глубокое обучение, свёрточные нейронные сети и рекуррентные нейронные сети, для более точного анализа сетевого трафика и устранения других ограничений традиционных систем. Это связано с тем, что искусственные нейронные сети лучше распознают шаблоны и выявляют нарушения, даже если они не следуют установленным векторам атаки, и могут автоматически решать многие проблемы без какого-либо вмешательства человека [15, 16]. Основываясь на теоретических исследованиях, проведённых в данной области, можно сказать, что искусственные нейронные сети с достаточным количеством нейронов на одном слое могут решить проблему несанкционированного доступа к информации [6–14]. Однако на практике увеличение количества вычислительных уровней, называемых скрытыми слоями, повышает в ряде приложений время обработки данных искусственными нейронными сетями, что требует значительных вычислительных мощностей. Исследования показывают, что для различных задач важным фактором, оказывающим влияние на производительность искусственных нейронных сетей, является функция активации [17–20]. Время принятия решения может отличаться на 25–35 % в зависимости от входных наборов данных и настроек гиперпараметров [21].

Функции активации формируют выходные данные искусственных нейронов и, следовательно, являются неотъемлемой частью нейронных сетей в целом и глубокого обучения в частности. Поскольку это один из параметров, который нельзя вывести непосредственно из данных, выбор подходящих функций активации зависит от персонала, создающего искусственную нейронную сеть (ИНС) [20, 23]. Каждая функция активации определяется математическим уравнением. Это уравнение влияет на процесс обучения. Во-первых, оно используется для вычисления выходных данных слоев нейронной сети, а во-вторых, оно работает для минимизации ошибок путём вычисления производных на каждом этапе обучения. Некоторые функции активации, такие как логистическая и ReLu, используются уже много десятилетий. Но с развитием исследований в области глубокого обучения появилось множество новых функций активации [17].

Функции активации влияют на экспрессивность сети, т. е. на способность сети аппроксимировать целевые функции, а также являются ключевыми факторами вычислительной сложности сети, что определяет вычислительные затраты на оптимизацию параметров. Рассмотрим популярные функции активации и их потенциал для решения задачи обнаружения вторжений (табл. 1).

Такие функции активации как линейная или ступенчатая подходят для решения простых задач, таких как определение наличия интернет-соединения, т. е. они позволяют создать двоичный классификатор, который даёт возможность выдавать ответы «да» или «нет». Но если мы хотим создать глубокую нейронную сеть с более чем одним нейроном, то возникнет путаница, ведь наличие одного «да» приводит к выдаче положительного результата, следовательно, мы не можем заметить вмешательство нарушителя в информационную систему, ведь можно перепутать потоки данных, и нарушителю будет легко замаскировать взлом. Следовательно, для решения задач СОВ требуется более гибкая функция, способная давать промежуточные значения активации. Такие функции как сигмоидная или гиперболический тангенс подходят для задач классификации, это объясняется тем, что её поведение позволяет находить четкие границы при решении задач классификации. Однако стоит обратить внимание на то, что при приближении к краям сигмовидных функций выходные значения слабо реагируют на изменения входного вектора, что негативно сказывается на обучении нейронной сети [17, 20].

Таблица 1 – Математическое описание функций активации и их производных

	Функция активации		Уравнение функции	Производная функция	Диапазон функций
1	Ступенчатая		$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 0 \\ 1, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \neq 0 \\ ?, & \text{при } x = 0 \end{cases}$	{0,1}
2	Линейная		$f(x) = x$	$f'(x) = x$	$(-\infty; \infty)$
3	Сигмоида		$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$f'(x) = f(x)(1 - f(x))$	(0,1)
4	Гиперболический тангенс		$f(x) = \tanh(x)$	$f'(x) = 1 - \tanh(x)^2$	[-1,1]
5	ReLU	Classic ReLu	$f(x) = \max(0, x)$	$f'(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 0 \\ 1, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}$	[0, ∞)
		Leaky ReLu	$f(x) = \begin{cases} ax, & \text{при } x < 0 \\ x, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}$ (a = 0,01)	$f'(x) = \begin{cases} a, & \text{при } x < 0 \\ 1, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}$	$(-\infty; \infty)$
		Parametric ReLu	$f(x) = \begin{cases} ax, & \text{при } x < 0 \\ x, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} a, & \text{при } x < 0 \\ 1, & \text{при } x \geq 0 \end{cases}$	$(-\infty; \infty)$

Важным аспектом при выборе функции активации является так называемая разреженность активации. При построении нейронной сети с большим количеством нейронов использование сигмоиды или гиперболического тангенса будет влечь за собой активацию всех нейронов, что приводит к дополнительным ресурсным затратам. Следовательно, становится актуальным поиск функции активации, которая позволила бы сделать активацию разреженной и эффективной [18].

Одним из вариантов решения данной проблемы является использование функции ReLu, она позволяет задействовать меньшее количество нейронов и добиться разреженной активации. Но стоит отметить, что часть функции ReLu представляет из себя горизонтальную линию, градиент на этой части равен 0, в связи с чем, веса не будут корректироваться во время спуска – так называемый феномен умирания ReLu. Это означает, что пребывающие в таком состоянии нейроны не будут реагировать на изменения во входных данных. Однако существуют варианты решения данной проблемы, подробно описанные в [19].

Поскольку каждая из обсуждаемых активаций имеет определённые недостатки, растёт количество предлагаемых исследователями новых функций активации. Это такие функции, как: softplus, elu и selu, swish и др. К сожалению, некоторым из этих функций не хватает эмпирической или математической поддержки. На рисунке 1 приведено графическое представление актуальных функций активации, получивших наибольшее распространение в области COB.

Стоит отметить, что функции активации, имеющие схожие графики, предположительно дают схожие эмпирические результаты, когда параметры сети «достаточно оптимизированы». Это говорит о том, что выбор среди аналогичных функций активации должен основываться на том, сколько вычислительных усилий требуется для оптимизации параметров сети, т. е. на том, насколько простыми являются функции активации с вычислительной точки зрения. Следовательно, каждая функция активации имеет свои преимущества и недостатки, подробно описанные в [17, 20]. Например, сигмовидная активация страдает от проблемы исчезающего градиента. Эта проблема решается активацией ReLu, но эта функция часто сталкивается с проблемой умирания ReLu. Этот недостаток преодолевается функциями Leaky ReLu и Parametric ReLu [18, 19]. Таким образом, функция активации ReLu имеет потенциал при создании глубоких нейронных сетей, так как она менее требовательна к вычислительным ресурсам, чем гиперболический тангенс или сигмоида и производит более простые математические операции.

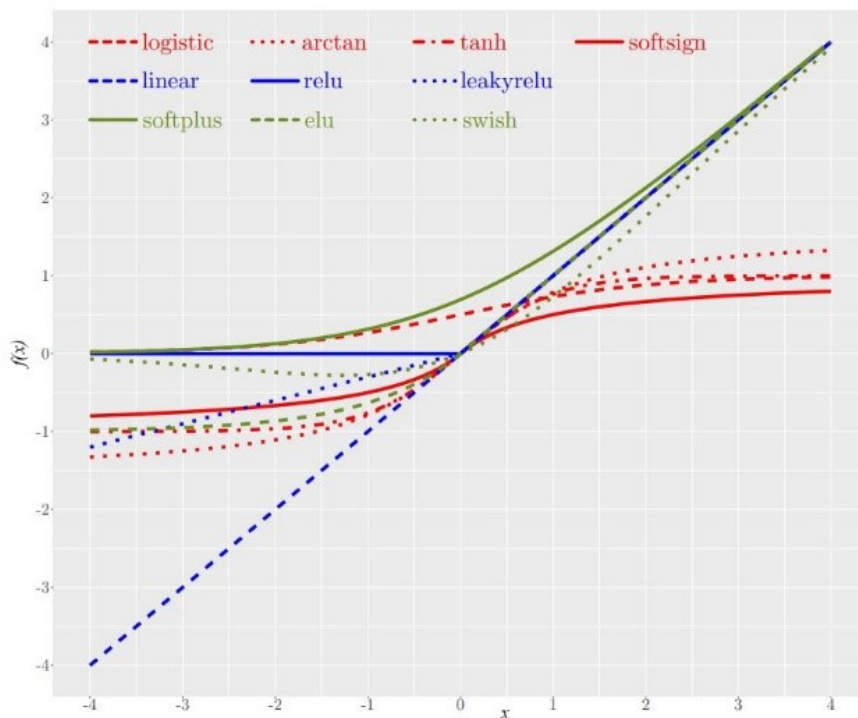


Рисунок 1 – Функции активации: сигмовидные функции (красный), кусочно-линейные функции (синий) и другие функции (зеленый)

Таким образом, выбор эффективной функции активации нейронной сети поможет достичь баланса между скоростью и достоверностью распознавания вредоносного трафика в локальной сети.

В работе использована база атак, основанная на открытой исходной библиотеке Malware TrainingSets [24], дополненная информационной базой атак, собранной в информационной системе крупного учебного заведения. Данные об атаках представляют собой текстовый файл, в котором разделены векторы атак и векторы, соответствующие нормальному трафику. Каждая запись представляет собой образ сетевого соединения и включает 43 информационных признака, последние два параметра являются меткой класса «атака/не атака» и меткой входа трафика «да/нет». Нейронная сеть, построенная с одинаковым количеством эпох, анализирует данный текстовый файл с использованием разных функций активации. После чего нейронная сеть предоставляет нам результирующий текстовый файл, содержащий статистические сведения, отражающие время обработки базы данных, а также процент соотношения правильно категоризированных атак. Основываясь на предоставленных сведениях, эксперт по информационной безопасности может сделать вывод о том, что осуществляется/не осуществляется несанкционированный доступ к информации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сетевой поток представляет собой двунаправленную последовательность пакетов, которыми обмениваются две конечные точки (например, веб-сервер и клиент) в течение определённого интервала времени с некоторыми общими свойствами потока [10], такими как IP-адреса источника и получателя, номера портов источника и получателя и тип протокола. Математическую модель обнаружения потенциально опасного трафика можно описать последовательностью следующих этапов. Определим сетевой поток F_L как последовательность упорядоченных пакетов P по формуле (1):

$$F_L = \{P_1, P_2, \dots, P_L\}, \quad 1 \leq i \leq L, \quad (1)$$

где L – длина полного потока (т. е. общее количество пакетов).

Обозначим набор данных потока как S , вычисляемый по (2):

$$S = \{(F_L^j, m_j)\}, \quad 1 \leq j \leq n, \quad (2)$$

где n – общее количество потоков F_L ;

m – соответствующие метки потоков.

Далее расширяем набор данных по методу дополнения данных путём создания большего количества данных (например, сетевых потоков) из существующих [22]. Для этого необходимо разбить исходный поток на короткие сегменты разной длины. Расширение набора данных применяется

только к потокам в обучающем наборе данных. Набор данных расширяется за счёт включения сегментированных сегментов потока. Определяем скорость сегментации S_{speed} , при этом $0 < S_{speed} < 1$.

Скорость сегментации S_{speed} – это гиперпараметр, который используется для расчёта размера сегмента для данного потока по (3):

$$S_{size} = [S_{speed} * L]. \quad (3)$$

Значение этого параметра управляет количеством сегментов, генерируемых на поток, например, чем меньше значение S_{speed} , тем больше сегментов на поток будет генерироваться. Пусть у нас есть поток $F_L^{(j)} = \{P_1, P_2, \dots, P_L\}$, тогда множество отрезков этого потока можно представить совокупностью (4):

$$\{F_{l=t*S_{size}}^{(j)} \mid t = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{L-1}{S_{size}} \right\rceil\}, \quad (4)$$

где все сегменты имеют ту же метку m_j , что и исходный поток.

Основная цель предлагаемой системы обнаружения потенциально опасного трафика – отслеживать сетевой трафик в режиме реального времени, автоматически извлекать функции из необработанных данных сетевого трафика, избегая при этом трудоёмкой задачи извлечения функций с использованием традиционных методов, и точно обнаруживать сетевые атаки. Процесс обнаружения вторжений подразделяется на три основных этапа: обучение, мониторинг, фильтрация, которые представлены на рисунке 2.

Шаг 1. Обучение. На данном этапе происходит изучение пространственно-временных характеристик необработанных сетевых потоков. Это необходимо для их дальнейшего использования при идентификации атак. Для контролируемого обучения необходим помеченный набор данных, который содержит обычные потоки и потоки, которые подверглись атакам. В дополнение к помеченным потокам в наборе данных также должны быть сетевые пакеты. Большинство общедоступных наборов данных, используемых для обучения и оценки СОВ, имеют проблему дисбаланса классов [8], т. е. количество примеров среди разных классов неодинаково в наборе данных. Классификатор, обученный на несбалансированном наборе данных, обычно демонстрирует низкую производительность с точки зрения общей точности прогнозирования. Поэтому следует обучать классификатор взвешиванием выборки, которое выступает в качестве коэффициента для значения потерь, вычисляемого для каждой выборки (потока) в процессе обучения. Вес каждого образца зависит его класса. Он рассчитывается обратно пропорционально частотам классов в обучающих данных.

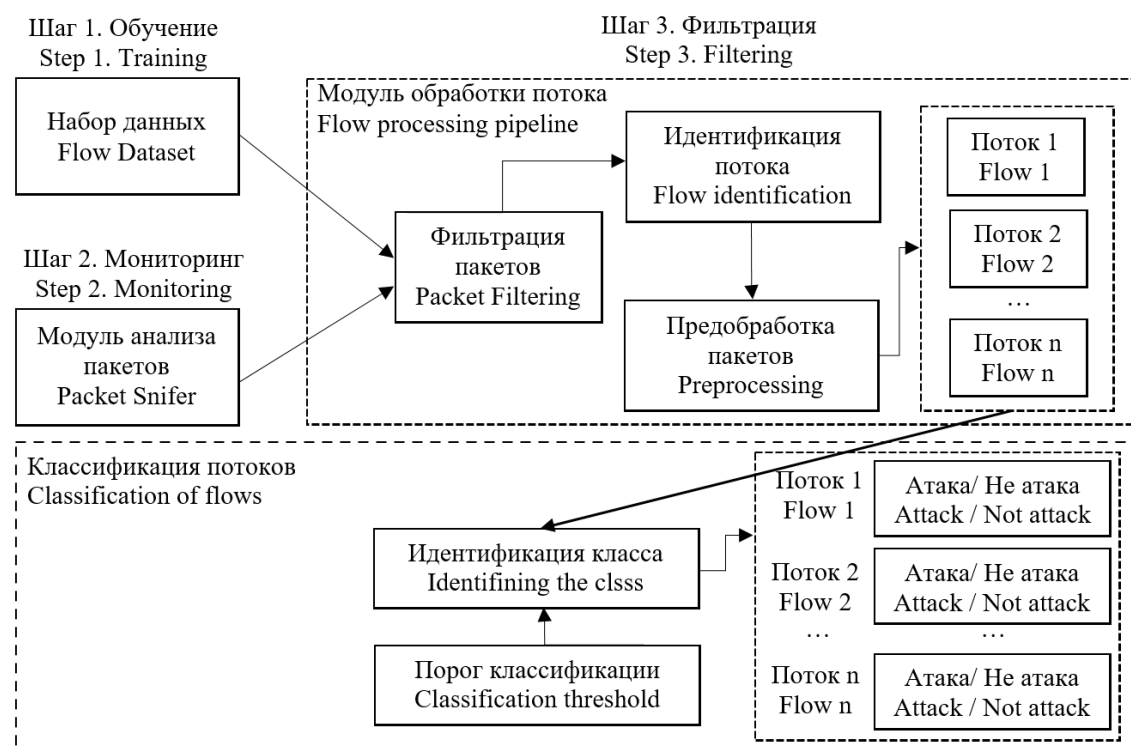


Рисунок 2 – Система обнаружения вторжений с использованием нейронной сети

Шаг 2. Мониторинг. Мониторинг высокоскоростных сетей в режиме реального времени является сложной задачей из-за высокой скорости передачи пакетов. Поэтому целесообразно захватывать и обрабатывать только те сетевые пакеты, которые относятся к целевому типу атак. Модуль анализа пакетов отвечает за мониторинг сетевого трафика, он захватывает и перенаправляет входящие и исходящие сетевые пакеты в модуль обработки потока, как показано на рисунке 2. По мере увеличения порога классификации количество ложных срабатываний (т. е. результатов, указывающих на то, что данный поток является атакой, когда это не так) уменьшается, что повышает точность классификации. Порог классификации устанавливается сетевым администратором, который наблюдает за сетевым трафиком и отвечает за принятие контрмер против атак на основе результатов классификации.

Шаг 3. Фильтрация. Модуль фильтрации пакетов захватывает сетевые пакеты и пересылает их последующим модулям, если они удовлетворяют заданным критериям. Например, если защищаемым объектом является веб-сервер, работающий на порту 80, то можно настроить модуль фильтрации для пересылки только тех пакетов, у которых порт назначения или источника равен 80, или, например, если необходимо обнаружить только веб-атаки, то данный модуль будет перехватывать только HTTP-пакеты. Далее пакеты группируются в сетевые потоки. При каждом обновлении сетевого потока новым пакетом данных будет срабатывать классификатор потока для распределения пакета к одному из классов «атака/не атака» с меткой входа трафика. Таким образом, происходит отслеживание необработанного сетевого трафика между защищаемой системой и ненадежной сетью.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Разработан программный модуль, построенный на базе искусственной нейронной сети и функционирующий в режимах: обучение, мониторинг и фильтрация потенциально вредоносного трафика. Интерфейс модуля показан на рисунке 3. Здесь в верхней части показана панель для выбора функции активации нейронной сети. Слева расположены опции ведения протокола (в отладочных целях могут выводиться тип атаки, время атаки, а также данные пакета в виде байтов) и удобства тестирования модуля (возможность автоматического сохранения файла и подстановки результата в качестве входного потока данных после обработки). Справа расположен поток сетевого трафика. Ниже находится индикатор прогресса текущей обработки.

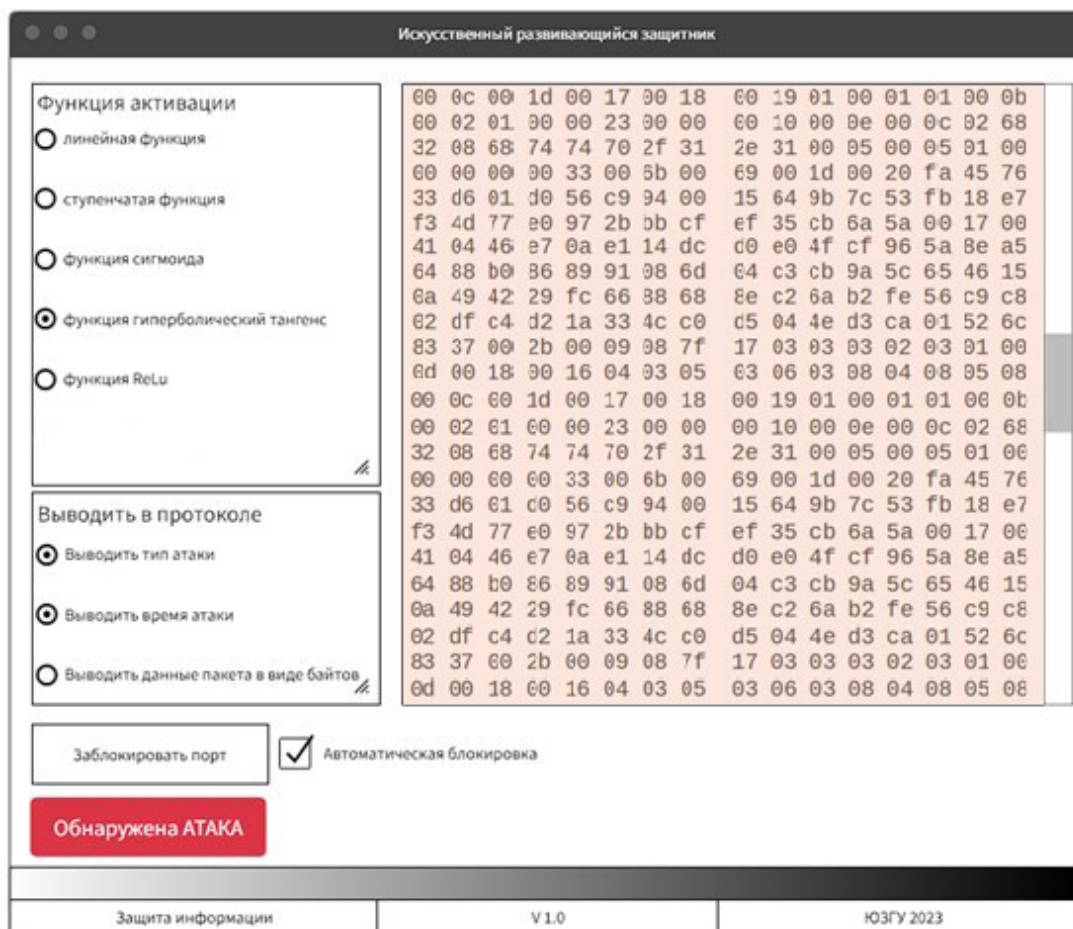


Рисунок 3 – Интерфейс программного модуля обнаружения потенциально опасного трафика на базе нейронной сети

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На базе предложенных решений были проведены экспериментальные исследования по оценке влияния значений гиперпараметров нейронных сетей на быстродействие системы обнаружения вторжений, результаты которых представлены в таблице 2. Тестировались пять различных функций активации нейрона. Для каждой функции активации проводилось 10^3 экспериментов. Результатом были среднее время обработки и процент выявленных атак. За 100 % (так называемую единицу модельного времени) было взято наиболее длительное время обработки, которое было получено при тестировании программного модуля с использованием ступенчатой функции активации. Длительность остальных интервалов обработки и принятия решения показана в процентах от данного времени.

На рисунке 4 представлена сравнительная диаграмма, иллюстрирующая влияние соответствующей функции активации на быстродействие системы обнаружения вторжений и точность классификации.

Таблица 2 – Результаты работы нейросетевого модуля обнаружения вторжений при использовании различных функций активации

Функция активации	Относительное время обработки и принятия решения, %	Точность классификации, %
Ступенчатая	100	21
Линейная	97	30
Сигмоида	80	42
Гиперболический тангенс	86	81
ReLu	68	99

Влияние гиперпараметров нейронных сетей на быстродействие системы обнаружения вторжений

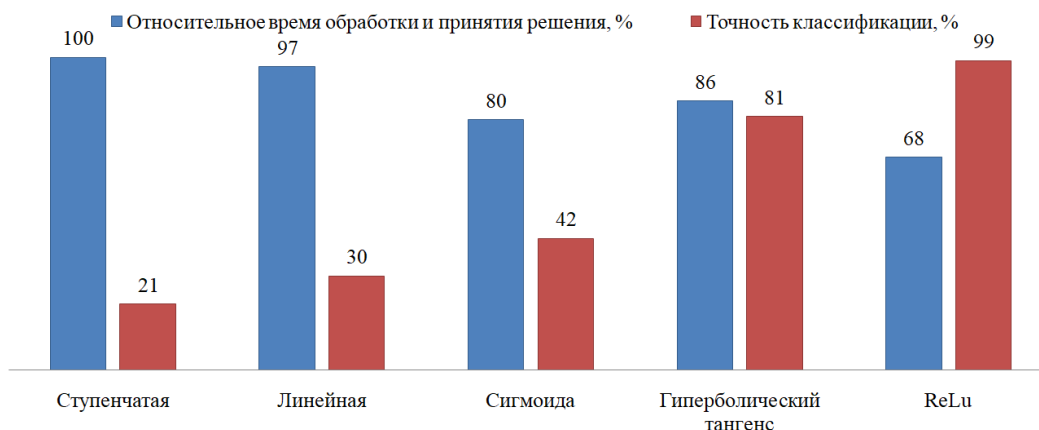


Рисунок 4 – Влияние гиперпараметров нейронных сетей на быстродействие системы обнаружения вторжений

Анализ полученных результатов показал, что для заданного набора данных функция активации ReLu показала наилучшую комбинацию результатов по точности классификации, которая достигла 99 % времени обработки относительно других функций активации. При использовании сигмоидной функции активации и функции гиперболический тангенс были получены близкие значения времени обработки, однако показатели классификации при выборе сигмоидной функции уступают функциям ReLu и гиперболический тангенс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье была проведена оценка влияния пяти функций активации на производительность и точность классификации нейронной сети, предназначенной для обнаружения вторжений. Обучение нейронной сети проходило на базе атак открытой библиотеки MalwareTrainingSets, дополненной информационной базой атак, собранной в информационной системе крупного учебного заведения.

На базе предложенных решений был синтезирован программный модуль, позволяющий повысить уровень информационной безопасности вычислительной сети за счёт управления параметрами выявления потенциально вредоносного трафика на основе нейронных сетей. Особенностью решения является поддержка баланса между скоростью и достоверностью распознавания потенциально опасного трафика за счёт динамического изменения настроек и использования расширенного блока настройки функции активации.

Точность обучения, проверки и тестирования наблюдалась вместе с общим временем, затраченным классификатором на обучение и тестирование. В ходе проведения экспериментальных ис-

следований была обоснована важность выбора соответствующей функции активации для повышения точности классификатора и сокращения времени вычислений. В дальнейших исследованиях планируется провести анализ влияния таких гиперпараметров, как количество слоёв нейронной сети, тип слоя свертки и т. д. (и их комбинаций), на работу системы обнаружения потенциально опасного трафика, построенной на базе нейронной сети.

Список источников

1. Zainel, H. LAN Intrusion Detection Using Convolutional Neural Networks / H. Zainel, C. Koçak // *Appl. Sci.* – 2022. – Vol. 12 (13). – P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/app12136645>.
2. Крыжановский, А. В. Применение искусственных нейронных сетей в системах обнаружения атак / А. В. Крыжановский, // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – № 2–1 (18). – С. 104–105.
3. Корнев, П. А. Применение инструментария искусственного интеллекта в системах обнаружения вторжений в вычислительные сети / П. А. Корнев, А. Н. Пылькин, А. Ю. Свиридов // *Современные проблемы науки и образования.* – 2014. – № 6. – С. 1715.
4. Власов, А. И. Нейросетевая система обнаружения и нейтрализации удаленного несанкционированного вмешательства в компоненты Интернета вещей / А. И. Власов, Е. Р. Захаров, В. О. Захарова // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 63–80. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202101-07>.
5. Воеводин, С. В. Применение нейронных сетей при обработке информации в сигнализационных средствах обнаружения / С. В. Воеводин, А. Е. Духан, Е. И. Духан, С. С. Звездинский // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт.* – 2015. – Т. 9, № 9. – С. 11–15.
6. Кочетов, Д. А. Нейросетевая технология обнаружения сетевых вторжений / Д. А. Кочетов, Е. П. Лукашик // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии.* – 2018. – № 2 (42). – С. 104–112.
7. Намиот, Д. Е. Искусственный интеллект и кибербезопасность / Д. Е. Намиот, Е. А. Ильющин, И. В. Чижов // *International Journal of Open Information Technologies.* – 2022. – Т. 10, № 9. – С. 135–147.
8. Ahmad, Z. Network intrusion detection system: A systematic study of machine learning and deep learning approaches / Z. Ahmad, A. Shahid Khan, C. Wai Shiang, J. Abdullah, F. Ahmad // *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies.* – 2021. – Vol. 32, № 1. <https://doi.org/10.1002/ett.4150>.
9. Vigna, G. Testing network-based intrusion detection signatures using mutant exploits / G. Vigna, W. K. Robertson, D. Balzarotti // *Proceedings of the 11th ACM Conference on Computer and Communications Security.* – USA, Washington, 2004. – P. 21–30.
10. Liao, H. Intrusion detection system: A comprehensive review / H. Liao, C. R. Lin, Y. Lin, K. Tung // *J. Netw. Comput. Appl.* – 2013. – Vol. 36 (1). – P. 16–24.
11. Li, J., Qu, Y., Chao, F., Shum, H. P. H., Ho, E. S. L., Yang, L. Machine Learning Algorithms for Network Intrusion Detection / J. Li, Y. Qu, F. Chao, H. P. H. Shum, E. S. L. Ho, L. Yang. – Cham : Springer International Publishing, 2019. – P. 151–179. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98842-96>.
12. Garcia-Teodoro, P. Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges / P. Garcia-Teodoro, J. E. D. Verdejo, G. Macia-Fern, E. Vazquez // *Comput. Secur.* – 2009. – Vol. 28 (1–2). – P. 18–28.
13. Мусиенко, С. С. Использование нейронных сетей для прогнозирования угроз информационной безопасности на примере DDoS-атак / С. С. Мусиенко // *Инновационные научные исследования.* – 2021. – № 2–3 (4). – С. 178–185. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4604863>.
14. Частикова, В. А. Нейросетевая технология обнаружения аномального сетевого трафика / В. А. Частикова, С. А. Жерлицын, Я. И. Воля, В. В. Сотников // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии.* – 2020. – № 1 (49). – С. 20–32. <https://doi.org/10.21672/2074-1707.2020.49.4.020-032>.
15. Браницкий, А. А. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак / А. А. Браницкий, И. В. Котенко // *Труды СПИИРАН.* – 2016. – № 2 (45). – С. 207–244. <https://doi.org/10.15622/SP.45.13>.
16. Moradi, M. A Neural Network Based System for Intrusion Detection and Classification of Attacks / M. Moradi, M. Zulkernine // *IEEE International Conference on Advanced in Intelligent Systems.* – Bulgaria, Varna, 2014. – P. 2–7.
17. Nwankpa, Ch. Activation Functions: Comparison of trends in Practice and Research for Deep Learning / Ch. Nwankpa, W. Ijomah, A. Gachagan, St. Marshall // *2nd International Conference on Computational Sciences and Technologies.* India, Mumbai. 2020. pp. 2–11.
18. Lederer, Johannes. Activation Functions in Artificial Neural Networks: A Systematic Overview / Johannes Lederer // *Computer Science.* – 2021. – P. 1–42. <https://doi.org/10.48550/arXiv:2101.09957>.
19. Alrawashdeh, K. Fast activation function approach for deep learning based online anomaly intrusion detection / K. Alrawashdeh, C. Purdy // *International Conference on Big Data Security on Cloud.* – USA, Omaha, 2018. – P. 5–13.
20. Le, T. T. H. Analyzing Effective of Activation Functions on Recurrent Neural Networks for Intrusion Detection / T. T. H. Le, J. Kim, H. Kim // *The Journal of Multimedia Information System.* – 2016. – Vol. 3 (3). – P. 91–96.
21. Gupta, N. Effect of Activation Functions on the Performance of Deep Learning Algorithms for Network Intrusion Detection Systems / N. Gupta, P. Bedi, V. Jindal // *Proceedings of ICETIT 2019.* – 2020. – Vol. 605. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30577-2_84.
22. Wu, Y. Network Attacks Detection Methods Based on Deep Learning Techniques: A Survey / Y. Wu, D. Wei, J. Feng // *Security and Communication Networks.* – 2020. – Vol. 2020 (1). – P. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2020/8872923>.
23. Abbasspour, A. A Neural Network-based Approach for Detection of Time Delay Switch Attack on Networked Control Systems / A. Abbasspour, A. Sargolzaei, M. Victorio, N. Khoshavi // *Procedia Computer Science.* – 2020. – Vol. 168. – P. 279–288.
24. MalwareTrainingSets. – URL: <https://github.com/marcoramilli/MalwareTrainingSets> (дата обращения: 16.03.2023).

References

1. Zainel, H., Koçak, C. LAN Intrusion Detection Using Convolutional Neural Networks. *Appl. Sci.*, 2022, no. 12 (13), pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/app12136645>.
2. Kryzhanovsky, A. V. Primeneniye iskusstvennykh neyronnykh setey v sistemakh obnaruzheniya atak [Application of artificial neural networks in intrusion detection systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2008, no. 2 (18), pp. 104–105.
3. Kornev, P. A., Pylkin, A. N., Sviridov, A. Yu. Primeneniye instrumentariya iskusstvennogo intellekta v sistemakh obnaruzheniya vtor-zheniy v vychislitelnyye seti [The use of artificial intelligence tools in intrusion detection systems for computer networks]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6, p. 1715.
4. Vlasov, A. I., Zakharov, E. R., Zakharova, V. O. Neyrosetevaya sistema obnaruzheniya i neytralizatsii udalennogo nesanktsionirovannogo vmeshatelstva v komponenty Interneta veshchey [Neural network system for detecting and neutralizing remote unauthorized intervention in the components of the Internet of things]. *Neyrokomputery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: development, application], 2021, vol. 23, no. 1, pp. 63–80. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202101-07>.
5. Voevodin, S. V., Dukhan, A. E., Dukhan, E. I., Zvezhinsky, S. S. Primeneniye neyronnykh setey pri obrabotke informatsii v signalizatsionnykh sredstvakh obnaruzheniya [The use of neural networks in the processing of information in signaling detection tools]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and transport], 2015, vol. 9, no. 9, pp. 11–15.
6. Kochetov, D. A., Lukashchik, E. P. Neyrosetevaya tekhnologiya obnaruzheniya setevykh vtor-zheniy [Neural Network Intrusion Detection Technology]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2018, no. 2 (42), pp. 104–112.
7. Namiot, D. E., Ilyushin, E. A., Chizhov, I. V. Artificial intelligence and cybersecurity. *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, vol. 10, no. 9, pp. 135–147.
8. Ahmad, Z. Network intrusion detection system: A systematic study of machine learning and deep learning approaches. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2021, vol. 32, no. 1. <https://doi.org/10.1002/ett.4150>.
9. Vigna, G., Robertson, W. K., Balzarotti, D. Testing network-based intrusion detection signatures using mutant exploits. *Proceedings of the 11th ACM Conference on Computer and Communications Security*. USA, Washington, 2004, pp. 21–30.
10. Liao, H., Lin, C. R., Lin, Y., Tung, K. Intrusion detection system: A comprehensive review. *J. Netw. Comput. Appl.*, 2013, vol. 36 (1), pp. 16–24.
11. Li, J., Qu, Y., Chao, F., Shum, H. P. H., Ho, E. S. L., Yang, L. *Machine Learning Algorithms for Network Intrusion Detection*. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 151–179. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98842-9_6.
12. Garcia-Teodoro, P., Verdejo, J. E. D., Macia-Fern, G., Vazquez, E. Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges. *Comput. Secur.*, 2009, vol. 28 (1–2), pp. 18–28.
13. Musienko, S. S. Ispolzovaniye neyronnykh setey dlya prognozirovaniya ugroz informatsionnoy bezopasnosti na primere DDOS-atak [Using Neural Networks to Predict Information Security Threats Using the Example of DDOS Attacks]. *Innovatsionnyye nauchnyye issledovaniya* [Innovative Scientific Research], 2021, no. 2–3 (4), pp. 178–185. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4604863>.
14. Chastikova, V. A., Zherlitsyn, S. A., Volya, Ya. I., Sotnikov, V. V. Neyrosetevaya tekhnologiya obnaruzheniya anomal'nogo setevogo trafika [Neural network technology for detecting abnormal network traffic]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 1 (49), pp. 20–32. <https://doi.org/10.21672/2074-1707.2020.49.4.020-032>.
15. Branitsky, A. A., Kotenko, I. V. Analiz i klassifikatsiya metodov obnaruzheniya setevykh atak [Analysis and classification of network attack detection methods]. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2016, no. 2 (45), pp. 207–244. <https://doi.org/10.15622/SP.45.13>.
16. Moradi, M., Zulkernine, M. A Neural Network Based System for Intrusion Detection and Classification of Attacks. *IEEE International Conference on Advanced in Intelligent Systems*. Bulgaria, Varna, 2014, pp. 2–7.
17. Nwankpa, Ch., Ijomah, W., Gachagan, A., Marshall, St. Activation Functions: Comparison of trends in Practice and Research for Deep Learning. *2nd International Conference on Computational Sciences and Technologies*. India, Mumbai, 2020, pp. 2–11.
18. Lederer, Johannes. Activation Functions in Artificial Neural Networks: A Systematic Overview. *Computer Science*, 2021, pp. 1–42. <https://doi.org/10.48550/arXiv:2101.09957>.
19. Alrawashdeh, K., Purdy, C. Fast activation function approach for deep learning based online anomaly intrusion detection. *International Conference on Big Data Security on Cloud*. USA, Omaha, 2018, pp. 5–13.
20. Le, T. T. H., Kim, J., Kim, H. Analyzing Effective of Activation Functions on Recurrent Neural Networks for Intrusion Detection. *The Journal of Multimedia Information System*, 2016, vol. 3 (3), pp. 91–96.
21. Gupta N., Bedi P., Jindal V. Effect of Activation Functions on the Performance of Deep Learning Algorithms for Network Intrusion Detection Systems. *Proceedings of ICETIT 2019*, 2020, vol. 605. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30577-2_84.
22. Wu, Y., Wei, D., Feng, J. Network Attacks Detection Methods Based on Deep Learning Techniques: A Survey. *Security and Communication Networks*, 2020, vol. 2020 (1), pp. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2020/8872923>.
23. Abbasspour, A., Sargolzaei, A., Victorio, M., Khoshavi, N. A Neural Network-based Approach for Detection of Time Delay Switch Attack on Networked Control Systems. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 168, pp. 279–288.
24. MalwareTrainingSets. Available at: <https://github.com/marcoramilli/MalwareTrainingSets> (accessed 16.04.2023).

Статья поступила в редакцию 28.03.2023; одобрена после рецензирования 10.04.2023; принята к публикации 13.04.2023.

The article was submitted 28.03.2023; approved after reviewing 10.04.2023; accepted for publication 13.04.2023.

УДК 004.4

**АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА,
ОЦЕНКИ И ПОМОЩИ ПАЦИЕНТАМ С БОЛЕЗНЬЮ ПАРКИНСОНА**

Дюк Филипп Чике Окороджи, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Волгоград, пр. им. В.И. Ленина 28, Российская Федерация, аспирант, ORCID: 0009-0003-8722-5666, e-mail: dukechike007@gmail.com

Количество пациентов с болезнью Паркинсона, нуждающихся в эффективном отслеживании их текущего состояния, растёт каждый год. Это связано с увеличением стоимости мониторинга и лечения пациентов с этой болезнью. Целью исследования является создание системы мониторинга, оценки и реабилитации больных с болезнью Паркинсона на основе задач, поставленных перед пациентами. В настоящее время системы дистанционного мониторинга пациентов пользуются широким спросом в связи с пандемией коронавируса. В статье приводится описание как программного обеспечения, так и аппаратной архитектуры, а также анализ методов оценки состояния пациентов с болезнью Паркинсона. Решение включает в себя: нейронную сеть, которая используется для классификации состояния пациентов, модули сбора данных (сбор речевых данных, данных видеоанализа и данных анализа рукописного ввода) и модуль реабилитации, который предназначен для предоставления пациентам заданий с целью снижения скорости ухудшения состояния. Однако пациенты (особенно пожилые пациенты) часто отказываются от упомянутого выше решения, поскольку оно предполагает использование незнакомого и дополнительного оборудования (такого, как сеть датчиков тела). Таким образом, стандарты удобства использования и приемлемости не соблюдаются. Тем не менее установка датчиков в вашем доме обходится дорого и навязчиво. Наконец, пациент не может получать поддержку вдали от дома с помощью беспроводного подключения к домашнему серверу. Архитектура системы была выбрана как недорогая (в ней используются датчики на смартфоне), гибкая (её можно использовать, когда пациента нет дома) и менее навязчивая, чем предыдущая система. Для разработки общей архитектуры программного обеспечения были использованы методы математического моделирования, системного анализа, программной инженерии, объектно-ориентированного программирования и технологий проектирования взаимодействия человека и машины. Таким образом, данная статья показала, что предложенный нами метод дистанционного наблюдения за пациентами полностью подходит для мониторинга текущего состояния. Работая по этому методу, приложение зафиксировало все аномалии в полученных показателях и успешно информирует о них. Для разработки общей архитектуры программного обеспечения были использованы методы математического моделирования, системного анализа, разработки программного обеспечения, объектно-ориентированного программирования и технологий проектирования взаимодействия человека и машины. Была предложена общая архитектура для ежедневного мониторинга пациентов с болезнью Паркинсона. Разработаны все компоненты и архитектурная модель, необходимая для мониторинга людей с болезнью Паркинсона. Таким образом, данная статья показала, что предложенный нами метод дистанционного наблюдения за пациентами полностью подходит для мониторинга текущего состояния. Работая по этому методу, приложение зафиксировало все аномалии в полученных показателях и успешно записывает информацию о них.

Ключевые слова: болезнь Паркинсона, дистанционное наблюдение, мониторинг состояния пациентов

**ARCHITECTURE OF THE SOFTWARE SYSTEM FOR MONITORING,
ASSESSMENT AND ASSISTANCE TO PATIENTS WITH PARKINSON'S DISEASE**

Dyuk Filipp Chike Okorodzhi, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, postgraduate student, ORCID: 0009-0003-8722-5666, e-mail: dukechike007@gmail.com

The number of patients with Parkinson's disease who need effective tracking of their current condition is increasing every year, due to the increasing cost of monitoring and treating patients with this disease. The aim of the study is to create a system for monitoring, evaluating, and rehabilitating Parkinson's disease patients based on tasks set for patients. Currently, remote monitoring systems for patients are in high demand due to the COVID-19 pandemic. The article describes both software and hardware architecture and an analysis of methods for evaluating Parkinson's disease patients' state. The solution includes: a neural network used for classifying patient states, data collection modules (speech data collection, video analysis data, and handwriting analysis data), and a rehabilitation module that provides patients with tasks aimed at reducing the rate of deterioration. However, patients (especially elderly patients) often refuse this solution because it involves the use of unfamiliar and additional equipment (such as a body sensor network). Therefore, usability and acceptability standards are not met. Furthermore, setting up sensors in your home is expensive and intrusive. Finally, the patient cannot receive support remotely from home via wireless connection to the home server. The architecture was chosen as inexpensive (using smartphone sensors), flexible (it can be used when the patient is not home), and less intrusive than the previous system. Methods of mathematical modeling, systems analysis, software engineering, object-oriented programming, and human-machine interaction design were used to develop the overall software architecture. Thus, this article showed that the proposed remote patient monitoring method is fully suitable for monitoring the current state. Working under this method, the application recorded all anomalies in the received indicators and successfully informs about them. To develop the overall software architecture, mathematical modeling,

systems analysis, software development, object-oriented programming, and human-machine interaction design technologies were used. A general architecture was proposed for daily monitoring of Parkinson's disease patients. All components and the architectural model necessary for monitoring Parkinson's disease patients have been developed. Thus, this article showed that the proposed remote patient monitoring method is fully suitable for monitoring the current state. Working under this method, the application recorded all anomalies in the received indicators and successfully recorded information about them.

Keywords: Parkinson's disease, remote monitoring, monitoring status of patients

ВВЕДЕНИЕ

Болезнь Паркинсона (БП) поражает около 10 миллионов людей по всему миру и является наиболее распространённым возрастным заболеванием двигательных функций, а также вторым по частоте нейродегенеративным расстройством после болезни Альцгеймера [1, 2]. Пациенты с БП испытывают неправильные походки, такие как замедление движений (брадикинез), менее устойчивую ходьбу, более короткие шаги, неуверенные шаги или плохое начало походки [3, 4, 5].

С появлением новых технологий всё больше решений на основе искусственного интеллекта (ИИ) [6, 7, 8] разрабатываются для улучшения знаний о болезни Паркинсона [9] и диагностики заболевания на ранней стадии. Каждый год публикуется множество исследований, направленных на улучшение качества жизни пациентов, включая ускорение диагностики [10] и лечения [11] болезни Паркинсона. Двигательные симптомы болезни [12, 13] ограничивают способности пациентов выполнять рутинные повседневные задачи, такие как набор текста на компьютере.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Для оптимального комплексного лечения болезни Паркинсона необходимо обратиться к медицинскому специалисту. В случае уже поставленного диагноза очень важно, чтобы пациент следил за своим здоровьем, придерживался правильного питания и режима упражнений, а также выполнял все предписания врача.

Одним из ключевых моментов в успешном лечении болезни Паркинсона является тщательный мониторинг состояния пациента. При длительном приёме допаминергических лекарств может происходить изменение клинической картины заболевания. Однако мониторинг состояния пациента связан с рядом проблем, таких как:

- невозможность ежедневного наблюдения врача в поликлинике;
- недостаточное ознакомление врача с дневником пациента до его визита;
- отсутствие возможности тщательно изучить каждую страницу дневника за весь период наблюдения;
- неточность записи информации о пациенте, вызванная различными факторами, включая искажённое восприятие пациентом своего состояния.

Болезнь Паркинсона имеет пять стадий, которые были определены в конце 1960-х годов и до сегодняшнего дня используются [14]. Эта болезнь неизлечима, но при правильном лечении можно замедлить её прогрессирование и даже вернуться на предыдущую стадию, улучшив состояние пациента. Однако, если терапия не применяется, происходит быстрый переход от первой стадии к пятой.

В данной статье описывается архитектура информационной системы для мониторинга здоровья пациентов с болезнью Паркинсона. Она включает отдельные модули, такие как модули сбора данных, отправки данных врачу, классификации скорости деградации пациентов и отправки предложений по лечению пациенту.

При исследовании предыдущих работ и методов для удалённого мониторинга состояния пациентов с болезнью Паркинсона было обнаружено, что в данной области существует множество различных подходов. На сегодняшний день существует более миллиона различных медицинских приложений, которые используются для различных медицинских функций, таких как оценка симптомов, помощь пациентам в навигации, определение местоположения пациентов, поиск лекарств и мониторинг курса лечения. В данном разделе мы рассмотрим четыре бесплатных приложения для пациентов с болезнью Паркинсона: NeuroSpeech, Lift Pulse, 9zest, StrivePD и Parkinson's Therapy & Exercises.

Программа NeuroSpeech позволяет анализировать нарушения речи у людей с болезнью Паркинсона с точки зрения фонетики, артикуляции, просодии и понимаемости. Она использует обучающие данные и сравнивает здоровье пациента с данными, полученными от людей с болезнью Паркинсона и здоровых участников. Другие учёные и разработчики могут интегрировать другие заболевания и измерения в программное обеспечение для расширения его возможностей.

NeuroSpeech выполняет три задачи: моделирование речевых записей, определение сигналов Паркинсона и предсказание неврологического состояния пациента на основе оценки единой шкалы болезни Паркинсона. Однако программа не учитывает скорость ухудшения при анализе и понятна только для медицинских специалистов и исследователей.

NeuroSpeech помогает исследователям в области оценки патологической речи и может быть использована для интерпретации клинических данных и тестирования различных методов распознавания образов. Программа является открытой и бесплатно доступной.

Lift Pulse – это удобное приложение, которое позволяет записывать и анализировать дрожание рук. Оно является журналом, который записывает данные о движении, вызванном тремором. Датчики телефона обнаруживают и вычисляют величину дрожания рук пользователя. Приложение использует акселерометры телефона для записи тремора. Оно может обнаруживать тремор и вычислять его величину с помощью преобразования Фурье. Пользователь может настроить свой тремор, и цвет круга, отображающий результат пользователя, изменится в результате сравнения последующих показаний с базовой линией.

Принцип работы этого приложения прост и прямолинеен – пользователь загружает его и нажимает на кнопку, чтобы измерить тремор своих рук. Основными преимуществами использования этого приложения являются точное отслеживание показаний, передаваемых датчиками телефона, и точное считывание данных с устройства для измерения дрожания рук. Однако недостатком является то, что приложение измеряет только тремор и не включает другие параметры, поэтому его нельзя использовать для мониторинга и оценки болезни Паркинсона.

StrivePD – это программа, которая позволяет пользователям делиться своим ежедневным опытом лечения болезни Паркинсона с медицинской бригадой в перерывах между посещениями клиники с помощью приложения StrivePD и Apple часов. Медицинская команда по уходу будет использовать эту информацию, чтобы помочь пользователям в управлении их состоянием. Apple Watch автоматически распознает такие симптомы, как тремор и дискинезия. Тем временем пользователи могут использовать мобильное приложение StrivePD для отслеживания своих лекарств, активности и побочных эффектов.

Приложение помогает пациентам извлекать уроки из поведенческих паттернов и получать представление о своих симптомах. Используя данные Apple Watch и приложения Strive, приложение предоставляет неврологу пациентов более подробную информацию и помогает их медицинской команде разобраться в их специфическом опыте. Невролог имеет полное представление о ваших симптомах, что позволяет ему лучше понять переживания пациента.

Приложение также улучшает посещаемость кабинета невролога, приложение упрощает общение с командой по уходу за пациентом во время посещений офиса. Это облегчает бремя пациентов, напоминая им о взлетах и падениях, связанных с болезнью Паркинсона.

Приложение 9zest Parkinson's Therapy & Exercises помогает пациентам с болезнью Паркинсона вернуться к нормальной жизни, предоставляя удобное и доступное решение на дому. Упражнения были разработаны сертифицированными терапевтами и помогают с повседневной деятельностью, такой как еда, питье, письмо, одевание, ходьба и т.д., уменьшая проблемы, связанные с болезнью Паркинсона. Используя принципы нейропластичности, приложение сочетает в себе физиотерапию, логопедию, трудотерапию и йогу для борьбы с симптомами Паркинсона.

Приложение является решением для телетерапии, что позволяет не только экономить время, но и получать терапию премиум-класса по фиксированной цене. Программное обеспечение включает в себя следующие функции: простую оценку для создания персонализированной программы терапии, легко отслеживаемые аудио- и видеозаписи тренировок вместе с демонстрационным видео для каждого упражнения, индикатор прогресса, состоящий из тестов для измерения и отслеживания улучшений для выбранной цели, а также возможность выполнять упражнения в любое время и в любом месте с настройкой на основе вариаций и интенсивности.

Главным недостатком данного приложения является отсутствие взаимодействия с экспертом или профессионалом, таким как невролог-консультант. Существующие программы для оценки состояния пациента используют только один или два критерия, которые могут не присутствовать у всех пациентов с болезнью Паркинсона, и поэтому не могут использоваться для правильной оценки пациента.

Анализ этих четырех приложений показал, что эти приложения помогают им контролировать свои симптомы, выполнять упражнения (как физические, так и умственные) и включать полезные инструменты, такие как напоминания о приеме лекарств. Существуют также информационные приложения, которые информируют специалистов о деталях заболевания, а также приложения, помогающие оценивать PD-шкалы или собирать данные для клинических испытаний.

По крайней мере, одно приложение лечит все характерные симптомы заболевания, но не существует единого приложения, которое лечило бы все симптомы. В результате люди с болезнью Паркинсона могут выбрать приложение, которое наилучшим образом соответствует их потребностям. Например, есть приложения, предназначенные исключительно для лечения голосовых дисфункций, а другие – для лечения тремора. Для лечения определённого симптома часто требуется специальное приложение.

Основными недостатками всех этих приложений являются отсутствие связи со специалистом, таким как лечащий невролог, и требование выполнять определённые физические манипуляции для оценки симптомов болезни Паркинсона. Кроме того, все существующие приложения для оценки состояния пациента используют только один или два параметра, таких как тремор рук (который наблюдается не у всех пациентов с болезнью Паркинсона) или голос.

Мы попытались устранить эти недостатки в приведённом ниже решении для мониторинга состояния пациентов с болезнью Паркинсона. Мы создаём комплексное решение, которое объединяет сразу три основных параметра: оценку написанного текста, анализ голоса и анализ характера ходьбы.

АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ С БОЛЕЗНЬЮ ПАРКИНСОНА

Предлагаемая нами система работает так, как показано на рисунке 1, где отображены компоненты системы мониторинга состояния пациента с болезнью Паркинсона, а также взаимодействия между этими компонентами.

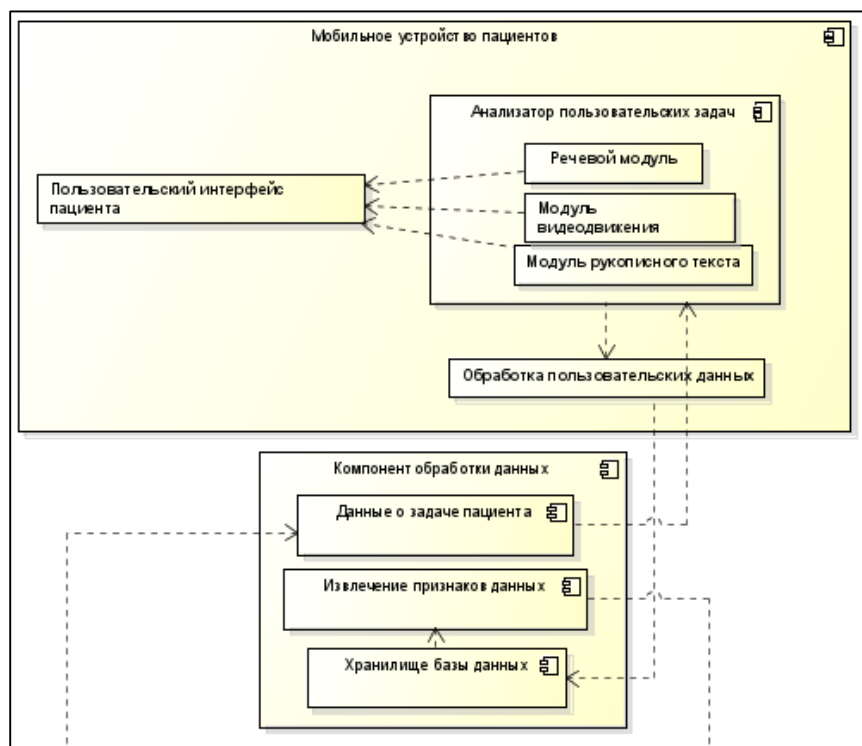


Рисунок 1 – Архитектура программных компонентов для мониторинга состояния пациентов с болезнью Паркинсона

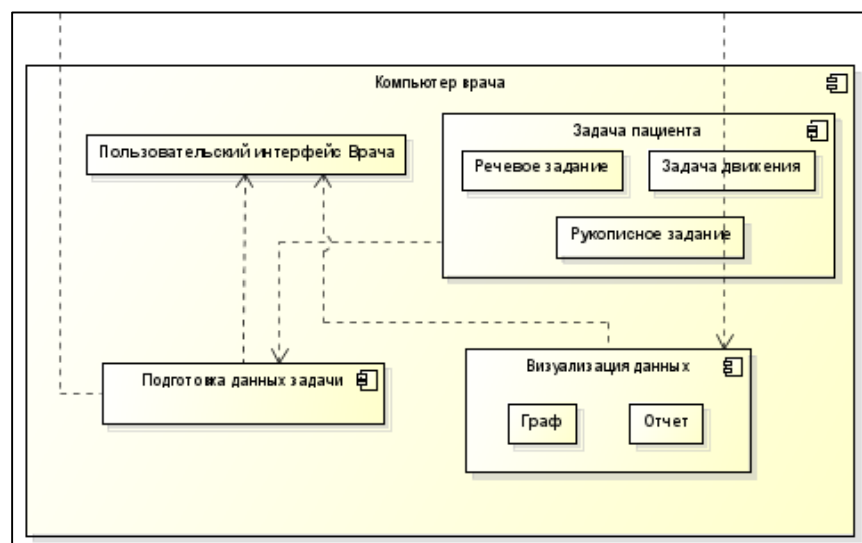


Рисунок 2 – Продолжение рисунка 1 «Архитектура программных компонентов для мониторинга состояния пациентов с болезнью Паркинсона»

Приложение отслеживает перемещения пациентов по мере выполнения ими поставленных задач. Пациент использовал приложение для выполнения действий, которые были назначены ему врачом. Приложение предоставляло пациенту инструкции на экране и руководство по мере выполнения задачи. Смартфон хранит локально собранные данные в течение короткого периода времени. Как только задача выполнена, метаданные и данные о движении доставляются на сервер. Серверная программа анализирует поступающие данные по конвейеру данных, чтобы оценить тяжесть заболевания, и затем оцененная тяжесть возвращается врачу в виде отчёта. На сервере, используемом для отслеживания истории заболеваний, хранятся все данные и аналитические выводы на трёх разных уровнях – уровне мобильного приложения, уровне передачи данных и уровне хранения данных. Конфиденциальность пациентов и безопасность данных гарантированы. Для доступа к мобильному приложению необходим процесс входа пользователя в систему. Все данные приложения, которые сохраняются локально на мобильном устройстве, шифруются, и после отправки данных на облачный сервер они удаляются с устройства. Мобильное приложение не хранит и не отображает никакой информации, позволяющей установить личность пациента.

Компонент «Компьютер врача». Здесь данные конвертируются в текстовый формат и сохраняются непосредственно в базе данных программного обеспечения, а реплика создаётся на компьютере врача. Таким образом, хранение данных на стороне врача аналогично потоку данных, т. е. всё сохраняется в своей первоначальной форме. Программное обеспечение содержит три уровня обработки данных. На первом уровне данные получают на стороне пациента, на втором уровне они обрабатываются на сервере для получения полного анализа и оценки, а на последнем уровне передаются на компьютер врача в читаемом формате. Все три уровня связаны между собой.

Компонент «Мобильное устройство пациентов» позволяет пациентам выполнять задачи, назначенные лечащим врачом. Если данные, полученные от пациента, не содержат аномалий, то они проверяются и отправляются в компонент обработки данных для дальнейшего анализа, который, в свою очередь, отправляет проанализированные результаты врачу. Аномалии могут включать неполные данные или данные, которые не могут быть обработаны компонентом обработки данных. Данные, полученные от пациентов, имеют важное значение, особенно на этапе обучения системы.

Для получения необходимых данных пациенты выполняют задачи, назначенные лечащим врачом, и данные фиксируются в момент выполнения задачи. Для записи голосовых сообщений пациенты могут использовать микрофон устройства, который позволяет записать голосовое сообщение для последующего анализа речи. Если данные, предоставленные пациентом, являются некорректными или задача выполнена неправильно, запись удаляется из базы данных, и пациенту нужно повторить задачу.

Для записи движений, назначенных лечащим врачом, пациенты могут использовать камеру устройства. Однако в некоторых случаях, таких как при оценке аспектов брадикинезии у пациентов с болезнью Паркинсона, серьёзные искажения движения и проблемы с плавностью видео могут затруднить оценку системы искусственного интеллекта. Для решения этой проблемы предлагается использовать камеру высокого разрешения и защищённую загрузку через интернет. Это позволит улучшить качество видео и уменьшить проблемы с недостаточной визуализацией пациента.

Для оценки почерка пациентов необходимо использовать телефонный стилус. Пациенты должны нарисовать спираль, треугольник или круг между линиями шаблона, избегая их пересечения, а также написать короткие предложения на английском языке в зависимости от задачи, назначенной им лечащим врачом.

Этот компонент «Обработка данных» состоит из трёх основных модулей: данные о задаче пациентов, модуль извлечения функций и модуль хранения базы данных. Для получения информации о пациенте мы используем методы интеллектуального анализа данных, которые включают индивидуальный почерк пациента, анализ речевых паттернов и анализ видеодвижений. Модуль содержит алгоритмы интеллектуального анализа данных для получения знаний о пациенте: симптомах заболевания и индивидуальном почерке пациента. При этом почерк пациента в данном случае отправляет к специфике управления телефоном, присущей только одному человеку.

Компонент обработки данных получает зашифрованный XML-файл, содержащий данные о движении, речи и письме. Модуль приёма данных расшифровывает и выделяет необработанные данные о движении и сопутствующие метаданные, которые включают частоту дискретизации, продолжительность времени, дату, тип теста и идентификатор пользователя, для каждой записи задачи, которую он получает. Запись задачи впоследствии добавляется модулем приёма в очередь сообщений для обработки синхронизированными обработчиками. Каждый асинхронный обработчик извлекает сообщение из очереди сообщений, передаёт информацию в базу данных, а затем обрабатывает её по конвейеру данных. Чтобы повысить масштабируемость системы и разъединить системные компоненты, мы обрабатываем данные с помощью очереди сообщений и синхронизированного

обработчика. Конвейер обработки данных выполняет последовательность процедур обработки сигналов и анализа данных. Конвейер калибрует ускорение до нулевой базовой линии после предварительного удаления шума с помощью фильтра нижних частот.

Наконец, модуль «Обработка данных» использует собранные данные для оценки тяжести заболевания на основе Единой рейтинговой шкалы болезни Паркинсона (UPDRS) и стадии заболевания. Этот модуль эффективно определяет скорость прогрессирования/регрессии заболевания.

Последнее необходимо для понимания: существуют ли какие-либо отличительные признаки использования телефона у пациентов с болезнью Паркинсона и держит ли пациент телефон в руках или это делает другой человек.

Модуль хранения базы данных является важной частью системы, поскольку необходимо сохранить все данные перед их обработкой. На устройстве пациента мы используем пакет “android.database.sqlite” из Android SDK. Этот пакет баз данных включает в себя реляционную базу данных SQLite и полнофункциональный SQL database engine. На сервере мы используем систему управления базами данных CouchDB для хранения данных. Эта система является документно-ориентированной и хранит данные в документах, похожих на JSON. CouchDB, как и MySQL, поддерживает индексы. В этой системе управления базами данных прекрасно реализована асинхронная репликация данных в концепции «ведущий – ведомый», а также существует возможность балансировки нагрузки с помощью горизонтального масштабирования. CouchDB поддерживает парадигму MapReduce.

ТИП НЕЙРОННОЙ СЕТИ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПАЦИЕНТОВ

Построение и обучение нейронной сети является одним из наиболее важных методов, используемых в интеллектуальном анализе данных. В последние годы наблюдается всплеск интереса к нейронным сетям, которые успешно используются в самых разных областях, таких как бизнес, медицина, технологии, геология и физика. На практике нейронные сети используются для решения таких задач, как прогнозирование, классификация и автоматизация. Наиболее распространёнными являются многослойные сети, которые объединяют нейроны в слои.

Сформирована задача контролируемого обучения аппроксимации функции для нейронной сети. Суть вопроса заключается в следующем. Функция имеет значения в различных местах (узлах), систему базисных функций и векторы с обратимыми весами. Требуется обучить сеть, т. е. выбрать веса для базовых функций таким образом, чтобы при их объединении получилась аналогичная зависимость, которая очень напоминает диапазон значений функции отклика.

Для решения задач аппроксимации экспериментальных данных использовались искусственные нейронные сети следующих типов: многослойный персептрон, сети с радиальными базисными функциями, вероятностные сети и обобщённые регрессионные сети.

Чтобы решить проблему градиентного ослабления при обучении рекуррентных нейронных сетей, была создана архитектура Долгая краткосрочная память (LSTM) в качестве дополнения к первоначальному дизайну. В сети возможно как краткосрочное, так и долгосрочное хранение ценностей [15, 16]. Библиотека TensorFlow была использована для разработки и обучения нейронных сетей. В этом случае гиперболический тангенс используется рекуррентными слоями в качестве функции активации. Скрытые полностью связанные слои нейронной сети были постепенно устранены по мере перехода к полностью рекуррентной архитектуре. В итоге результаты обучения неуклонно повышались, не влияя на производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная архитектура системы призвана помочь врачам в повышении качества лечения болезни Паркинсона и в её раннем выявлении. Мы также смогли свести к минимуму ошибки пациентов при выполнении задач, используя интеллектуальный анализ данных для автоматизации процесса получения более точных данных для приложения. Все эти решения предназначены для оказания помощи медицинским работникам в повышении качества лечения БП и ранней диагностике БП. В качестве общей цели ускорить процесс передачи данных по сети мы использовали выделенный сервер, который оценивает только данные, собранные с устройства пациента, и множество параметров в методах анализа скорости ухудшения состояния. Мы использовали методы создания оптимальной структуры баз данных документов (CouchDB), распараллеливания запросов и методы сокращения карты для ускорения обработки данных. Это позволило внедрить многопоточную архитектуру для более быстрой обработки данных и значительно повысило производительность системы мониторинга пациентов с болезнью Паркинсона.

Список источников

1. Левин, О. С. Болезнь Паркинсона / О. С. Левин, Н. В. Федорова. – Москва : ОАО ИПО «Лев Толстой», 2006.
2. Luna, E. Bent out of shape: α -Synuclein misfolding and the convergence of pathogenic pathways in Parkinson's disease / E. Luna, K. C. Luk // *FEBS Lett.* – 2015. – Vol. 589. – P. 3749–3759.
3. Kressig, R. W. Temporal and spatial features of gait in older adults transitioning to frailty / R. W. Kressig, R. J. Gregor, A. Oliver, D. Waddell, W. Smith, M. O'Grady, A. T. Curns, M. Kutner, S. L. Wolf // *Gait Posture.* – 2004. – Vol. 20. – P. 30–35.
4. Ellis, T. Which measures of physical function and motor impairment best predict quality of life in Parkinson's disease? / T. Ellis, J. T. Cavanaugh, G. M. Earhart, M. P. Ford, K. B. Foreman, L. E. Dibble // *Park. Relat. Disord.* – 2011. – Vol. 17. – P. 693–697.
5. Hannink, J. Sensor-Based Gait Parameter Extraction with Deep Convolutional Neural Networks / J. Hannink, T. Kautz, C. F. Pasluosta, K. G. Gasmann, J. Klucken, B. M. Eskofier // *IEEE J. Biomed. Health Inform.* – 2017. – Vol. 21. – P. 85–93.
6. Park, C. Prediction of Alzheimer's disease based on deep neural network by integrating gene expression and DNA methylation dataset / C. Park, J. Ha, S. Park // *Expert Syst. Appl.* – 2020. – Vol. 140. – P. 112873.
7. Desai, M. An anatomization on breast cancer detection and diagnosis employing multi-layer perceptron neural network (MLP) and Convolutional neural network (CNN) / M. Desai, M. Shah // *Clin. eHealth.* – 2021. – Vol. 4. – P. 1–11.
8. Sekeroglu, B. Detection of COVID-19 from Chest X-ray Images Using Convolutional Neural Networks / B. Sekeroglu, I. Ozsahin // *SLAS Technol.* – 2020. – Vol. 25. – P. 553–565.
9. Espay, A. J. Technology in Parkinson's disease: Challenges and opportunities / A. J. Espay, P. Bonato, F. B. Nahab, W. Maetzler, J. M. Dean, J. Klucken, B. M. Eskofier, A. Merola, F. Horak, A. E. Lang et al. // *Mov. Disord.* – 2016. – Vol. 31. – P. 1272–1282.
10. Loh, H. W. of deep learning models for automated identification of parkinson's disease: A review (2011–2021) / H. W. Loh, W. Hong, C. P. Ooi, S. Chakraborty, P. D. Barua, R. C. Deo, J. Soar, E. E. Palmer, U. R. Acharya // *Sensors.* – 2021. – Vol. 21. – P. 7034.
11. Mughal, H. Parkinson's Disease Management via Wearable Sensors: A Systematic Review / H. Mughal, A. R. Javed, M. Rizwan, A. S. Almadhor, N. Kryvinska // *IEEE Access.* – 2022. – Vol. 10. – P. 35219–35237.
12. Ulinskas, M. Analysis of Keystroke Dynamics for Fatigue Recognition / M. Ulinskas, M. Woźniak, R. Damaševičius // *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2017; LNCS, Lecture Notes in Computer Science (including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics).* – Springer : Cham, Switzerland, 2017. – Vol. 10408. – P. 235–247.
13. Ulinskas, M. Recognition of human daytime fatigue using keystroke data / M. Ulinskas, R. Damaševičius, R. Maskeliūnas, M. Woźniak // *Procedia Comput. Sci.* – 2018. – Vol. 130. – P. 947–952.
14. Hoeh, M. M. Parkinsonism: progression and mortality / M. M. Hoeh and M. D. Yahr // *Neumology.* – May 1967. – Vol. 17, no. 5. – P. 427–442.
15. Liu, Y. Vision-based method for automatic quantification of parkinsonian bradykinesia / Y. Liu, J. Chen, C. Hu, Y. Ma, D. Ge, S. Miao, Y. Xue, L. Li // *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.* – 2019. – Vol. 27. – P. 1952–1961.
16. Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // *Neural Computation.* – November 1997. – Vol. 9, no. 8. – P. 1735–1780.

References

1. Levin, O. S., Fedorova, N. V. *Parkinson's Disease*. Moscow, OAO IPO «Lev Tolstoy», 2006.
2. Luna, E., Luk, K. C. Bent out of shape: α -Synuclein misfolding and the convergence of pathogenic pathways in Parkinson's disease. *FEBS Lett.*, 2015, vol. 589, pp. 3749–3759.
3. Kressig, R. W., Gregor, R. J., Oliver, A., Waddell, D. Smith, W., O'Grady, M., Curns, A. T., Kutner, M., Wolf, S. L. Temporal and spatial features of gait in older adults transitioning to frailty. *Gait Posture*, 2004, vol. 20, pp. 30–35.
4. Ellis, T., Cavanaugh, J. T., Earhart, G. M., Ford, M. P., Foreman, K. B., Dibble, L. E. Which measures of physical function and motor impairment best predict quality of life in Parkinson's disease? *Park. Relat. Disord.*, 2011, vol. 17, pp. 693–697.
5. Hannink, J., Kautz, T., Pasluosta, C.F., Gasmann, K.G.; Klucken, J.; Eskofier, B.M. Sensor-Based Gait Parameter Extraction with Deep Convolutional Neural Networks. *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, 2017, vol. 21, pp. 85–93.
6. Park, C., Ha, J., Park, S. Prediction of Alzheimer's disease based on deep neural network by integrating gene expression and DNA methylation dataset. *Expert Syst. Appl.*, 2020, vol. 140, p. 112873.
7. Desai, M., Shah, M. An anatomization on breast cancer detection and diagnosis employing multi-layer perceptron neural network (MLP) and Convolutional neural network (CNN). *Clin. eHealth*, 2021, vol. 4, pp. 1–11.
8. Sekeroglu, B., Ozsahin, I. Detection of COVID-19 from Chest X-ray Images Using Convolutional Neural Networks. *SLAS Technol.*, 2020, vol. 25, pp. 553–565.
9. Espay, A. J., Bonato, P., Nahab, F. B., Maetzler, W., Dean, J. M., Klucken, J., Eskofier, B. M., Merola, A., Horak, F., Lang, A. E., et al. Technology in Parkinson's disease: Challenges and opportunities. *Mov. Disord.*, 2016, vol. 31, pp. 1272–1282.

10. Loh, H. W., Hong, W., Ooi, C. P., Chakraborty, S., Barua, P. D., Deo, R. C., Soar, J., Palmer, E. E., Acharya, U. R. Application of deep learning models for automated identification of parkinson's disease: A review (2011–2021). *Sensors*, 2021, vol. 21, p. 7034.
11. Mughal, H., Javed, A. R., Rizwan, M., Almadhor, A. S., Kryvinska, N. Parkinson's Disease Management via Wearable Sensors: A Systematic Review. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 35219–35237.
12. Ulinskas, M., Woźniak, M., Damaševičius, R. Analysis of Keystroke Dynamics for Fatigue Recognition. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2017; LNCS, Lecture Notes in Computer Science (including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer, Cham, Switzerland, 2017, vol. 10408, pp. 235–247.
13. Ulinskas, M., Damaševičius, R., Maskeliunas, R., Woźniak, M. Recognition of human daytime fatigue using keystroke data. *Procedia Comput. Sci.*, 2018, vol. 130, pp. 947–952.
14. Hoeh, M. M., Yahr, M. D. Parkinsonism: progression and mortality. *Neumlogy*, May 1967, vol. 17, no. 5, pp. 427–442.
15. Liu, Y., Chen, J., Hu, C., Ma, Y., Ge, D., Miao, S., Xue, Y., Li, L. Vision-based method for automatic quantification of parkinsonian bradykinesia. *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.*, 2019, vol. 27, pp. 1952–1961.
16. Hochreiter, S., Schmidhuber, J. Long short-term memory. *Neural Computation*, November 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780.

Статья поступила в редакцию 28.03.2023; одобрена после рецензирования 10.04.2023; принята к публикации 18.04.2023.

The article was submitted 28.03.2023; approved after reviewing 10.04.2023; accepted for publication 18.04.2023.

УДК 004.4

ТЕСТИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ HELPMETRACKER В МОНИТОРИНГЕ ФИКСАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УРОВНЯ КИСЛОРОДА В КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

Гилка Вадим Викторович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина 28, аспирант, ORCID: 0000-0003-1470-8766, e-mail: gilka_vv@mail.ru

Целью данного исследования является оценка применимости предложенного метода удалённого мониторинга состояния здоровья человека и анализ эффективности разработанного мобильного приложения HelpMeTracker, реализующего данный метод, в обнаружении отклонений показателей уровня кислорода в крови человека. Для определения работоспособности предлагаемого способа контроля состояния здоровья был проведён комплексный эксперимент, в ходе которого принимали участие люди различных возрастных категорий, социальных групп и люди, имеющие различные хронические заболевания. В рамках испытания мобильное приложение должно было отслеживать и анализировать динамику изменений в показателях сатурации человека, получаемых с датчиков, интегрированных в носимые устройства, такие как умные часы или фитнес-трекеры и своевременно информировать об обнаруженных отклонениях для возможности своевременного реагирования на изменения состояния здоровья. Таким образом, результаты эксперимента показали, что предложенный подход к удалённому мониторингу состояния пациентов обладает высокой пригодностью для наблюдения за текущим состоянием здоровья. Следуя разработанной методике, приложение надёжно определило все аномалии в показателях уровня кислорода в крови, собранных с датчиков носимых устройств, и успешно информировало участников о зафиксированных отклонениях. На основании чего можно сделать вывод, что использование разработанного подхода достаточно, чтобы обеспечить возможность определения отклонений в показателях сатурации, мониторинга динамики их изменений и формировании комплексной оценки состояния здоровья человека на основе собранных данных.

Ключевые слова: метод, приложение, состояние, отклонения, показатели, браслет, датчики, удалённый мониторинг пациентов, уведомления, push

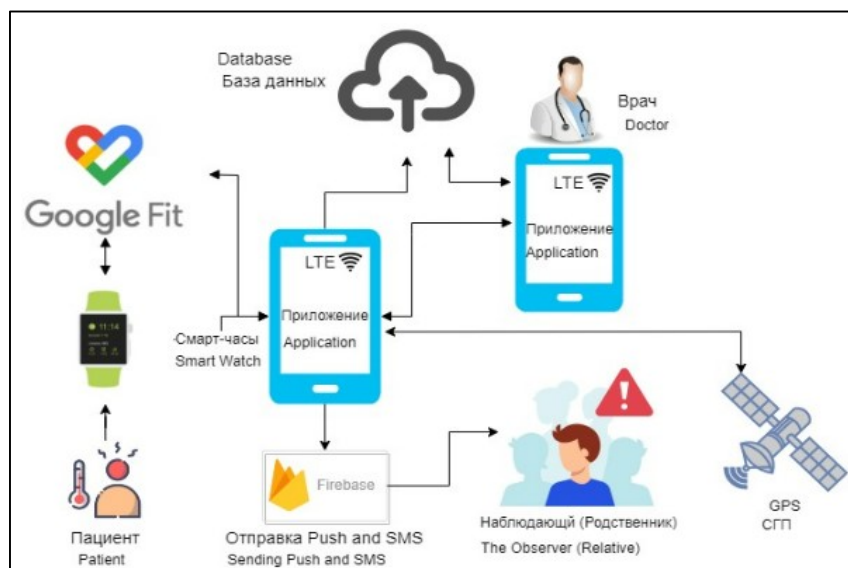
TESTING THE EFFICIENCY OF THE MOBILE APPLICATION HELPMETRACKER IN MONITORING DEVIATIONS IN HUMAN BLOOD OXYGEN LEVELS

Gilka Vadim V., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, postgraduate student, ORCID: 0000-0003-1470-8766, e-mail: gilka_vv@mail.ru

The aim of this study is to evaluate the applicability of the proposed remote human health monitoring method and analyze the effectiveness of the developed mobile application HelpMeTracker, which implements this method, in detecting deviations in human blood oxygen levels. To determine the feasibility of the proposed health monitoring approach, a comprehensive experiment was conducted involving participants of various age groups, social backgrounds, and with different chronic diseases. As part of the trial, the mobile application was expected to track and analyze the dynamics of changes in human saturation indicators obtained from sensors integrated into wearable devices, such as smartwatches or fitness trackers, and to promptly inform about detected deviations to allow timely response to health status changes. Thus, the experiment results demonstrated that the proposed approach to remote patient monitoring exhibits high suitability for observing the current health status. Following the developed methodology, the application reliably identified all anomalies in blood oxygen levels collected from wearable device sensors and successfully informed participants about the recorded deviations. Based on this, it can be concluded that the use of the developed approach is sufficient to provide the ability to detect deviations in saturation indicators, monitor their dynamics, and form a comprehensive assessment of a person's health based on the collected data.

Keywords: method, application, condition, deviations, indicators, bracelet, sensors, remote monitoring of patients, notifications, push

Graphical annotation (Графическая аннотация)

**ВВЕДЕНИЕ**

В современном мире мобильные приложения (МП) играют значительную роль в области мониторинга здоровья, предоставляя пользователям множество инструментов для отслеживания различных параметров их организма и становятся всё более популярными и неотъемлемыми инструментами для поддержания здоровья и благополучия. Одним из ключевых направлений в этой области является использование таких приложений для удалённого мониторинга пациентов (УМП), которые предоставляют возможность контроля за состоянием здоровья на расстоянии и обеспечивают своевременное вмешательство медицинского персонала при необходимости [1, 2]. Развитие таких МП для УМП активно способствует повышению доступности и эффективности медицинской помощи, а также улучшению качества жизни больных. Благодаря этим технологиям, пациенты могут получить непрерывный мониторинг своего состояния, а медицинский персонал – оперативную информацию для принятия оптимальных решений по лечению и наблюдению. Внедрение мобильных приложений для УМП способствует эффективному контролю физиологических показателей, таких как частота сердечных сокращений, артериальное давление, сатурация, уровень глюкозы в крови и другие параметры. Эти данные собираются с помощью современных носимых устройств и затем передаются на мобильные устройства пользователей для анализа, обработки и хранения. Согласно детальному аналитическому отчету о динамике рынка мобильных приложений в области здравоохранения, наблюдается постоянное увеличение популярности и использования таких приложений во всем мире. Исследование показывает, что, согласно показателю CAGR (совокупный среднегодовой темп роста), ожидается значительный прирост их применения на период с 2020 по 2027 г., составляющий 45,0 % [3]. Прогрессивное развитие этого сегмента рынка указывает на постоянно возрастающую потребность в улучшении качества и доступности медицинских услуг. Расширение возможностей дистанционного мониторинга пациентов способствует не только оптимизации процессов в медицинских учреждениях, но и улучшению самостоятельного контроля здоровья со стороны пациентов. Эти данные свидетельствуют о важности и актуальности разработки таких приложений.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Провести анализ предложенного метода (УМП) [4] с целью оценки его применимости для отслеживания текущего состояния здоровья человека.

Реализовать экспериментальное исследование по оценке реакции разработанного мобильного приложения на разнообразные отклонения в показателях сатурации.

Удостовериться в работоспособности разработанного мобильного приложения «HelpMeTracker» [5, 6] (на примере, одного из жизненно важного показателей (далее ЖВП) – уровень кислорода в крови, выделенного нами в ходе анализа возможностей современных устройств, таких как смарт-часы и фитнес-трекеры [4]).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования способов удалённого мониторинга пациентов (далее УМП), проведённого в 2021 г., был предложен новый метод контроля текущего состояния здоровья, а после в результате

разработки приложения были внесены некоторые корректировки, конечный результат которых показан в соответствии с рисунком 1. В представленном методе можно увидеть, каким образом происходит процесс получения данных с носимых устройств, таких как смарт-часы или фитнес-трекеры (браслеты). Подробное описание его работы приводится в [5, 6].

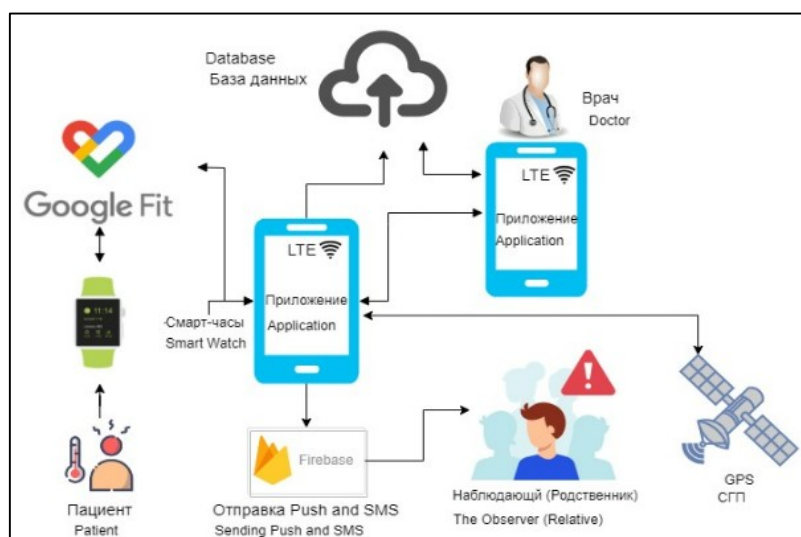


Рисунок 1 – Метод определения текущего состояния здоровья

Общая структура иерархии классов системы, их коопераций, атрибутов, методов, интерфейсов и взаимосвязей между ними концептуального уровня показана на рисунке 2.

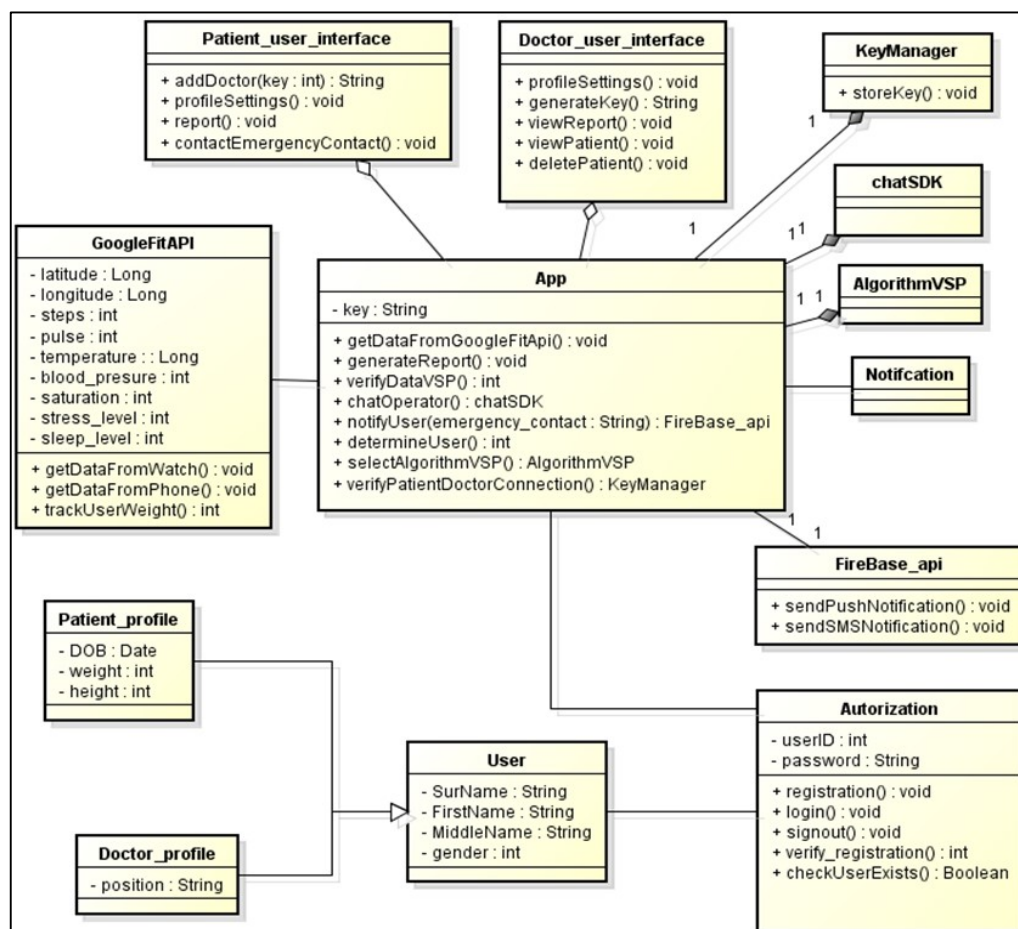


Рисунок 2 – Архитектура приложения в нотации UML

Класс «Authorization» отвечает за авторизацию в приложении. Класс «User» отвечает за создание пользователя в системе и в зависимости от того, какой профиль будет создаваться у пациента или врача, из классов «Patient_profile» и «Doctor_profile» будут наследоваться соответствующие поля. Класс «GoogleFitAPI» отвечает за отправку и получения ответа о VSP от GoogleFit API. В приложении в зависимости от вида профиля будут скрыты или доступны определенные формы. За отображение необходимых форм в интерфейсе пациента отвечает класс «Patient_user_interface», а за содержимое для врача класс «Doctor_user_interface». Класс «KeyManager» отвечает за генерацию уникального ключа, по которому будет осуществляться подключение пациента к врачу. Класс «chatSDK» отвечает за подключение библиотеки Chat SDK которая отвечает за средства коммуникации между больным и врачом. Класс «AlgorithmVSP» содержит в себе алгоритмы, по которым будут выполняться аварийные инструкции приложением. Класс «Notification» отвечает за отображение уведомлений в приложении. Класс «Firebase_api» отвечает за подключение к Firebase API, который необходим для отправки Push- и SMS-уведомлений. Детальное описание архитектуры приводится в статье [5].

В процессе исследования, основываясь на анализе медицинской литературы и консультациях с медицинскими специалистами, были определены возрастные границы, категории показателей, а также диапазоны верхних и нижних пределов значений, используемые в разработанном приложении [8–16]. В таблице 1 представлена выделенная классификация по возрастам.

Таблица 1 – Классификация возрастов

Название категории	Диапазон возрастов
Молодой возраст	18–29
Зрелый возраст	30–39
Средний возраст	40–59
Пожилой	60+

Такое разделение является необходимым, поскольку в зависимости от возрастных характеристик жизненно важные показатели (ЖВП) различаются и не всегда могут быть универсальными для всех возрастных групп.

В таблице 2 представлены категории показателей, а также диапазоны показателей уровня кислорода в крови верхних и нижних границ для каждой из них.

Таблица 2 – Границы показателей уровня кислорода в крови

Категории Возраст	Норма	В пределах нормы	Умеренные		Критическое	
			ниж. гр.	верх. гр.	ниж. гр.	верх. гр.
18–29	95–98	95–99	92–95	–	80–92	100
30–39	95–98	95–99	92–95	–	80–92	100
40–59	95–98	95–99	92–95	–	80–92	100
60+	93–98	94–99	91–94	–	80–91	100

Опираясь на информацию, изложенную в таблице 2, и проведя комплексный анализ данных, были определены критические значения уровня кислорода в крови для каждой возрастной группы и категории пациентов. Эти значения служат критериями, при достижении которых мобильное приложение активирует процесс оповещения в случае обнаружения датчиками отклонений в показателях сатурации. С целью обеспечения индивидуализации подхода к мониторингу состояния здоровья пациентов и учёта возможных физиологических различий между ними, для каждой возрастной группы и категории были установлены пороговые значения, соответствующие их возрасту.

Опираясь на данные, представленные в таблице 2, были определены значения для каждой возрастной группы и категории, при которых мобильное приложение должно реагировать на обнаружение датчиками отклонений в показателях сатурации. Эти значения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Границы показателей уровня кислорода в крови

Категории Возраст	Норма	В пределах нормы	Умеренные (Push)		Критическое (Push, SMS, SOS)	
			Ниж. гр.	Верх. гр.	Ниж. гр.	Верх. гр.
18–29	–	–	≥ 92 и ≤ 94	–	≤ 91	100
30–39	–	–	≥ 92 и ≤ 94	–	≤ 91	100
40–59	–	–	≥ 92 и ≤ 94	–	≤ 91	100
60+	–	–	≥ 91 и ≤ 93	–	≤ 90	100

Из таблицы 3 видно, что в случае получения приложением данных об уровне кислорода в крови с датчиков устройства, попадающих в диапазон нижних и верхних границ умеренных значений, будет отправляться push-уведомление с отчётом наблюдаемому пользователю, наблюдателю и медицинскому работнику при условии активации функции уведомления для выбранного пациента. Если полученное значение оказывается в диапазоне нижних и верхних границ критических значений, активируется режим экстренного реагирования (SOS), который включает отправку push- и SMS-уведомления с отчётом наблюдаемому и наблюдателю, а также запускается сигнала тревоги на телефонах обоих пользователей.

Эксперимент проводился в течение 3 месяцев и для его проведения применялись браслеты «Honor mi band 5», «Huawei Watch GT 3», «Honor Watch ES» «Huawei Watch D» «Huawei watch 3 Pro». В течение эксперимента испытуемые должны были соблюдать ряд простых условий:

- вести свою обычную повседневную деятельность;
- исключить физические нагрузки;
- полностью соблюдать предписания врача по приёму лекарственных препаратов, если таковые имеются.

Наблюдатели во время эксперимента должны были выполнять следующие действия:

- фиксировать, когда приходит простое push-уведомление или включается режим экстренного реагирования (SOS), и фиксировать показатели с временем, когда это произошло, любым из удобных способов;
- установка связи с наблюдаемым в случае, когда приложение реагирует, чтобы уточнить состояние человека.

Общее количество принимающих участие в тесте приложения составило 21 человек. В категорию 18–29 лет вошли 7 человек, 2 из которых здоровые, 5 потребляют табачные изделия. В возрасте 30–39 лет вошли 5 человек, 3 из которых здоровые, 1 астматик, 1 курильщик. От 40–59 лет вошли 5 человек, 2 из которых здоровые, 2 потребители табака и 1 на реабилитации после COVID-19. В группе 60+ все 4 испытуемых не имели болезней, связанных с нарушением сатурации.

На основе проведённого эксперимента были получены следующие результаты. В возрастной категории 18–29 лет отклонения были зафиксированы у трёх человек, данные которых представлены в соответствии с рисунком 3.

Из полученных сведений о наблюдаемых видно, что у испытуемого «а» первое отклонение в показателях насыщения крови кислородом (SpO_2) была зафиксирована на отметке 94 % и в последующее время динамика изменялась в худшую сторону. Такая аномалия была вызвана высоким потреблением табачных изделий в вечерний период времени испытуемым.

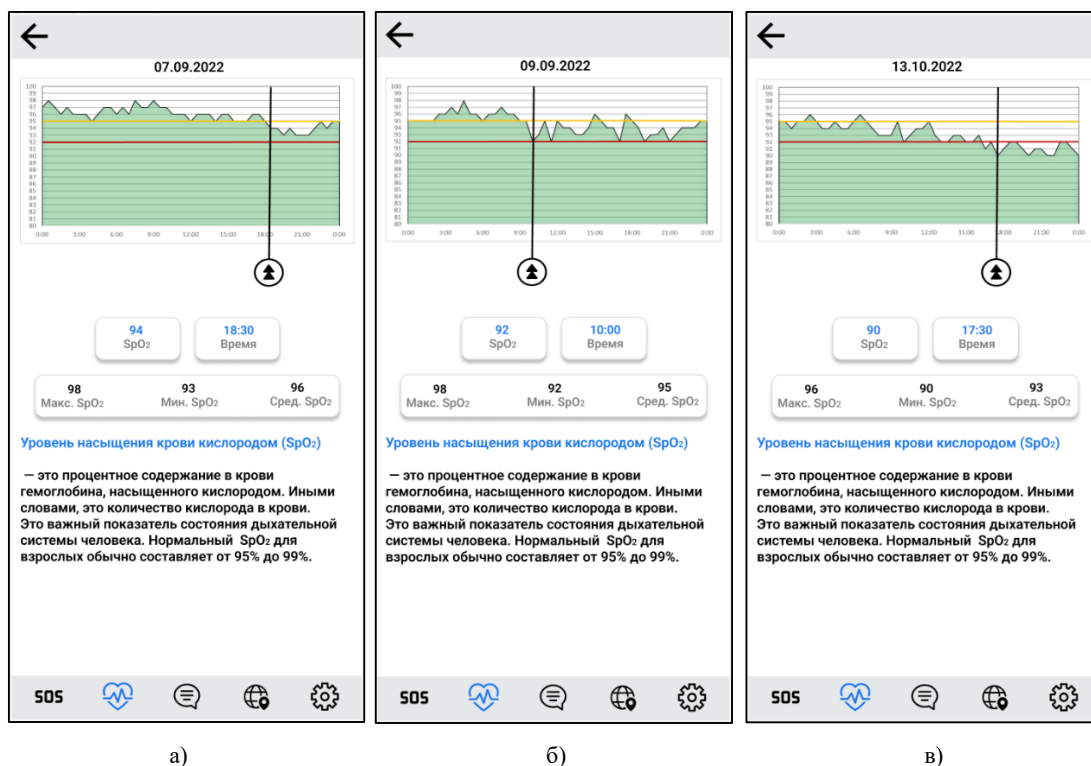


Рисунок 3 – Отклонения показателей испытуемых в возрастной категории 18–19 лет

Из показаний испытуемого «б», который активно потребляет табак на протяжении всех суток, можем увидеть, что динамика сатурации находится в основном за границами пределов нормы в рамках умеренных значений согласно таблице 3 и лишь иногда приближаясь к критическим, где первое отклонение было зафиксировано на показателе 92 %. Из результатов испытуемого «в» видно, что изначально было определено умеренное отклонение на отметке 94 %, после в течение суток фиксировалось ухудшение динамики показателей до критических значений, самое низкое из которых составило 90 %. Состояние испытуемого постепенно ухудшалось, и последующие сутки он был госпитализирован в больницу, где ему был поставлен диагноз «пневмония».

В возрастной категории 30–39 лет отклонения были зафиксированы у двух людей, данные которых представлены в соответствии с рисунком 4. Из сведений, полученных у испытуемого «г», с диагнозом хронической астмы, первое отклонение сатурации было зафиксировано в 4 часа утра на отметке 94 %, а минимальное отклонение на уровне 92 %. Динамика показателей за границы умеренных значений не выходила. Данное отклонение, как выяснилось после визита к врачу, было вызвано острой респираторной вирусной инфекцией ввиду того, что до этого в течение дня у человека начали проявляться признаки заболевания. Аномалии в состоянии испытуемого «д» были зафиксированы в диапазоне умеренных значений, где первое отклонение было отмечено на отметке в 94 %. Данные отклонения связаны с чрезмерным потреблением табачных изделий испытуемым.

В категории 40–59 лет отклонения были зафиксированы у двух людей, данные которых представлены на рисунке 5. Из полученных результатов мы видим, что у испытуемого «е» показания в отклонении SpO₂ начали наблюдаться ближе ко второй половине дня, где первое зафиксированное значение составило 94 % и постепенно в течение времени динамика начала изменяться к границам умеренных значений.

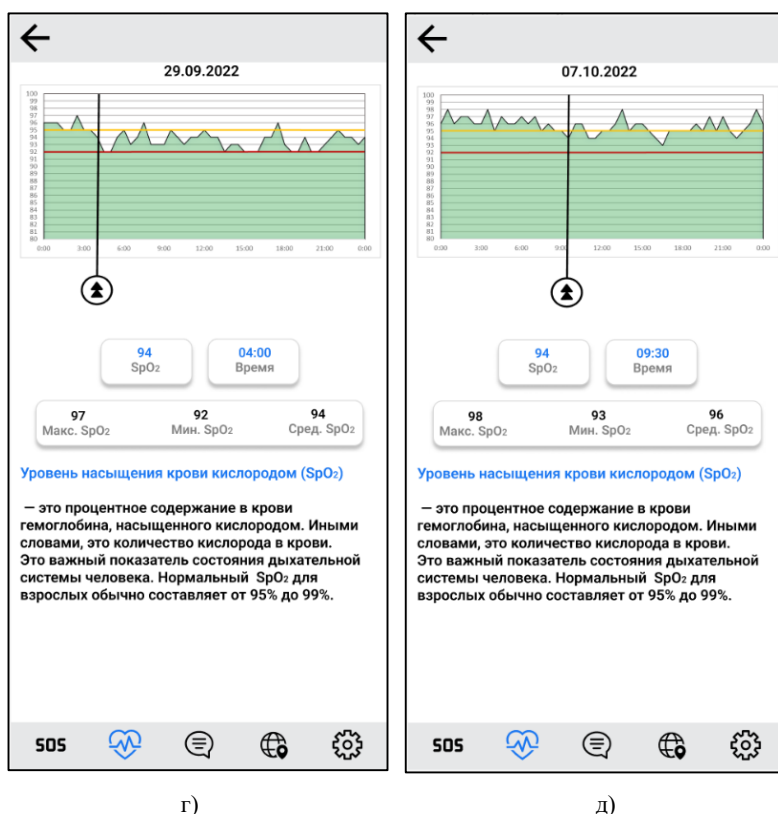
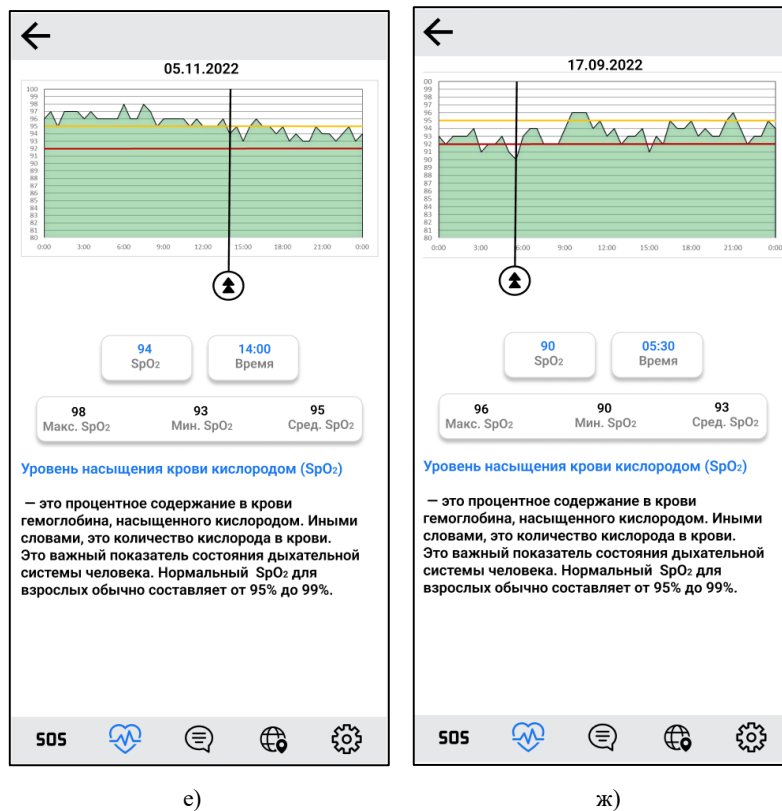


Рисунок 4 – Отклонения показателей испытуемых в возрастной категории 30–39 лет

На основе полученных данных было определено, что состояние наблюдаемого начало ухудшаться, и после визита к врачу ему был поставлен диагноз «острый бронхит». У наблюдаемого «ж» на момент эксперимента уже была низкая сатурация, которая стала следствием перенесённого респираторного заболевания COVID-19, и приложение использовалось для отслеживания общей динамики показателей SpO₂, чтобы зафиксировать возможное ухудшение или улучшение состояния здоровья.



с)

ж)

Рисунок 5 – Отклонения показателей испытуемых в возрастной категории 40–59 лет

В возрасте от 60-ти лет аномалия была зафиксирована лишь у одного наблюдаемого, сведения которого можно посмотреть в соответствии с рисунком 6.



з)

Рисунок 6 – Отклонения показателей испытуемых в возрастной категории 40–59 лет

Из графика видно, что отклонение наблюдалось в районе 11 часов дня, где полученное значение составило 92 %. После проверки наблюдаемого было установлено, что с человеком всё в порядке и чем было вызвано такое понижение, было не ясно.

В ходе испытания у всех возрастных категорий пользователей приложением были успешно зафиксированы отклонения в состоянии их здоровья. При получении умеренных показателей push-уведомления успешно отправлялись, и также у наблюдаемого «в», «ж», когда были получены критические показатели, режим экстренного реагирования успешно сработал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эксперимент по оценке функциональности мобильного приложения “HelpMeTracker” для удалённого мониторинга состояния пациента, а также эксперимент по анализу реакции приложения на различные отклонения показателей уровня кислорода в крови на реальных испытуемых, можно считать успешным. Приложение зафиксировало все аномалии в показателях, получаемых с датчиков браслета помимо тех, которые обозревались, и осведомляло наблюдателей об этом одним из способов, которые ранее описывались в статье. Эксперимент показал, что предложенный нами метод удалённого мониторинга пациентов является полностью пригодным для контроля текущего состояния человека.

Список источников

1. Farias, F. A. C. Remote Patient Monitoring: A Systematic Review / F. A. C. Farias, C. M. Dagostini, Y. A. Bicca, V. F. Falavigna, A. Falavigna // *Telemed J. E. Health*. – 2020 May. – № 26 (5). – P. 576–583. doi: 10.1089/tmj.2019.0066.
2. Stranieri, Andrew. Remote Patient Monitoring for Healthcare / Andrew Stranieri & Venki Balasubramanian. – 2019. – doi: 10.4018/978-1-5225-7277-0.ch009.
3. Healthcare Mobile Application Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Fitness Products Training, Appointment Booking & Construction), By Platform, By Technology, By End User, And Segment Forecasts, 2020–2027 // Grandviewresearch. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/healthcare-mobile-applications-market/methodology> (дата обращения: 11.04.2023).
4. Гилка, В. В. Разработка метода и архитектуры мобильного приложения для удаленного мониторинга текущего состояния человека на основе данных жизненно важных показателей с датчиков / В. В. Гилка, Ю. А. Орлова, Д. Х. Хужахметова, А. С. Кузнецова // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 212–230.
5. Gilka, V. V. Architecture of the Android Application for Monitoring Person's Condition Based on Data Readings from Sensors of Smart Watches and Mobile Devices / V. V. Gilka, Y. A. Kachanov, A. S. Kuznetsova // *Novel & Intelligent Digital Systems : Proceedings of the 2nd International Conference (NiDS 2022)*. NiDS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Cham, 2023. – Vol. 556. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17601-2_22.
6. Гилка, В. В. Общая архитектура взаимодействия компонентов Android приложения HelpMeTracker для удаленного отслеживания текущего состояния человека / В. В. Гилка // *России – творческую молодежь : материалы XV Всерос. науч.-практ. студ. конф. (г. Камышин, 20–22 апреля 2022 г.) : в 4 т. / под общ. ред. И. В. Степанченко ; ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – Т. 3. – С. 13–16.*
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613348 Российская Федерация. HelpMeTracker : № 2023611626 : заявл. 30.01.2023 : опубл. 14.02.2023 / В. В. Гилка.
8. Покровский, В. М. Физиология человека : учебник / под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротко. – 3-е изд. – М. : Медицина, 2011. – 664 с. – ISBN 978-5-225-10008-7.
9. Физиология человека : в 3 т. / Й. Дудель, Й. Рюэйт, Р. Шмидт [и др.]. – Москва : Мир, 1996. – Т. 1. – 323 с. – ISBN 5-03-002544-8.
10. Физиология человека : в 3 т. / М. Циммерман, В. Ениг, В. Вутке [и др.]. – Москва : Мир, 1996. – Т. 2. – 313 с. – ISBN 5-03-002544-8.
11. Физиология человека : в 3 т. / Х.-Ф. Ульмер, К. Брюк, К. Эве [и др.]. – Москва : Мир, 1996. – Т. 3. – 198 с. – ISBN 5-03-002544-8.
12. Анатомия и физиология человека : учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования / И. В. Гайворонский, Г. И. Ничипорук, А. И. Гайворонский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательский центр «Академия», 2011. – 496 с.
13. Нормальная физиология : учебник / Н. А. Агаджанян, В. М. Смирнов. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : ООО «Издательство «Медицинское информационное агентство», 2012. – 576 с.
14. Наглядная физиология / С. Зильбернагель, А. Деспопулос ; пер. с англ. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 408 с.
15. Орлов, Р. С. Нормальная физиология : учебник / Р. С. Орлов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 832 с.
16. Агаджанян, Н. А. Нормальная физиология : учебник для студентов медицинских вузов / Н. А. Агаджанян, В. М. Смирнов. – М. : ООО «Издательство «Медицинское информационное агентство», 2009. – 520 с.

References

1. Farias, F. A. C., Dagostini, C. M., Bicca, Y. A., Falavigna, V. F., Falavigna, A. Remote Patient Monitoring: A Systematic Review. *Telemed J. E. Health*, 2020 May, no. 26 (5), pp. 576–583. doi: 10.1089/tmj.2019.0066.
2. Stranieri, Andrew & Balasubramanian, Venki. *Remote Patient Monitoring for Healthcare*, 2019. doi: 10.4018/978-1-5225-7277-0.ch009.
3. Healthcare Mobile Application Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Fitness Products Training, Appointment Booking & Construction), By Platform, By Technology, By End User, And Segment Forecasts, 2020–2027. *Grandviewresearch*. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/healthcare-mobile-applications-market/methodology> (дата обращения: 11.04.2023).
4. Gilka, V. V., Orlova, Y. A., Khuzhakhmetova, D. H., Kuznetsova, A. S. Razrabotka metoda i arkhitektury mobilnogo prilozheniya dlya udalennogo monitoringa tekushchego sostoyaniya cheloveka na osnove dannykh zhiznenno vazhnykh pokazateley s datchikov [Development of a method and architecture of a mobile application for remote monitoring of the current state of a person based on vital signs data from sensors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye* [Proceedings of the Southwestern State University. Series: Management, Computer engineering, Computer science. Medical instrumentation], 2021, vol. 11, no. 4, pp. 212–230.
5. Gilka, V. V., Kachanov, Y. A., Kuznetsova, A. S. Architecture of the Android Application for Monitoring Person's Condition Based on Data Readings from Sensors of Smart Watches and Mobile Devices. *Novel & Intelligent Digital Systems : Proceedings of the 2nd International Conference (NiDS 2022). NiDS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, 2023, vol. 556. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17601-2_22.
6. Gilka, V. V. Obshchaya arkhitektura vzaimodeystviya komponentov Android prilozheniya HelpMeTracker dlya udalennogo otslezhivaniya tekushchego sostoyaniya cheloveka The general architecture of interaction of components of the Android application HelpMeTracker for remote tracking of the current state of a person]. *Rossii – tvorcheskuyu molodezh : materialy XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy studencheskoy konferentsii* [Russia – creative youth : materials of the XV All-Russian scientific and practical student conference (Kamyshin, April 20–22, 2022)], in 4 vol. Volgograd, 2022, vol. 3, pp. 13–16.
7. Gilka, V. V. *Certificate of state registration of the computer program no. 2023613348 Russian Federation. HelpMeTracker* : no. 2023611626 : application 30.01.2023 : publ. 14.02.2023
8. Pokrovsky, V. M., Korotko, G. F. (ed.) *Fiziologiya cheloveka : uchebnik* [Human physiology : textbook]. 3th ed. Moscow, Meditsina Publ., 2011. 664 p. ISBN 978-5-225-10008-7.
9. Dudel, J., Ruegg, J., Schmidt, R. et al. *Fiziologiya cheloveka : uchebnik* [Human physiology : textbook], in 3 vol. Moscow, Mir Publ., 1996, vol. 1. 323 p. ISBN 5-03-002544-8.
10. Zimmerman, M., Enig, V., Vutke, V. et al. *Fiziologiya cheloveka* [Human physiology], in 3 vol. Moscow, Mir Publ., 1996, vol. 2. 313 p. ISBN 5-03-002544-8.
11. Ulmer, H.-F., Brück, K., Ewe, K. et al. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology], in 3 vol. Moscow, Mir Publ., 1996, vol. 3. 198 p.
12. Gaivoronsky, I. V., Nichiporuk, G. I., Gaivoronsky, A. I. *Anatomiya i fiziologiya cheloveka : uchebnik dlya studentov uchrezhdeniy srednego professionalnogo obrazovaniya* [Human anatomy and physiology : studies for students of institutions of secondary vocational education]. 6th ed., reprint. and add. Moscow, Publishing Center “Academy”, 2011. 496 p.
13. Aghajanyan, N. A., Smirnov, V. M. *Normalnaya fiziologiya : uchebnik* [Normal physiology : textbook]. 3th ed., rev. and add. Moscow, LLC “Publishing House “Medical Information Agency”, 2012. 576 p.
14. Silbernagl, S., Despopoulos, A. *Naglyadnaya fiziologiya : uchebnik* [Visual physiology: textbook]. Moscow, BINOM. Laboratoria Znaniy Publ., 2013. 408 p.
15. Orlov, R. S. *Naglyadnaya fiziologiya : uchebnik* [Normal physiology : textbook]. 2nd ed., rev. and add. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2010. 832 p.
16. Aghajanyan, N. A., Smirnov, V. M. *Normalnaya fiziologiya : uchebnik dlya studentov meditsinskikh vuzov* [Normal physiology : textbook for medical university students]. Moscow, Publishing House “Medical Information Agency” LLC, 2009. 520 p.

Статья поступила в редакцию 17.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 27.04.2023.

The article was submitted 17.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 27.04.2023.

УДК 004.032.26

КЛАССИФИКАЦИЯ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО ГИСТОЛОГИЧЕСКИМ МИКРОФОТОГРАФИЯМ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сасов Дмитрий Александрович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, магистрант, ORCID: 0009-0008-7950-1073, e-mail: s-dima29@yandex.ru

Зубков Александр Владимирович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, аспирант, ORCID: 0000-0003-0425-5695, Zubkov.Alexander.v@gmail.com

Дорофеев Никита Алексеевич, Волгоградский государственный медицинский университет, 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, площадь Павших Борцов, 1, младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0003-2679-7524, e-mail: dorofeev.na@mail.ru

Орлова Юлия Александровна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, доктор технических наук, заведующая кафедрой, ORCID: 0000-0003-4854-7462, e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Фролов Максим Юрьевич, Волгоградский государственный медицинский университет, 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, площадь Павших Борцов, 1, кандидат медицинских наук, доцент, ORCID: 0000-0003-2679-7524, e-mail: clinpharmrussia@yandex.ru

В данной работе рассмотрены современные методы классификации рака молочной железы по гистологическим микропрепаратам с помощью нейронных сетей. Также были выделены наиболее популярные архитектуры нейронных сетей, которые отлично справляются с задачами бинарной и многоклассовой классификации микрофотографий молочной железы. В качестве данных для обучения была взята часть крупного отечественного датасета, содержащая 6050 изображений в разрешении 300x300 и увеличение x4. Поскольку в выбранном датасете классы были несбалансированны, к данным была применена аугментация (отражение и вращение изображений). Для обучения были выбраны следующие модели: ResNet 152, DenseNet121, Inception_resnet_v2, которые отлично себя показали на выбранном датасете, достигнув ассигуры в диапазоне от 0,9708 до 0,9912. Благодаря использованию выбранных моделей удалось добиться более высокой ассигуры, чем в контрольном исследовании. Результаты, полученные в рамках данного исследования, будут использованы для дальнейшего расширенного тестирования моделей в задачах классификации гистологических изображений молочной железы. Лучшие модели по итогам тестирования будут использованы в системе поддержки принятия решений для врачей-патологоанатомов, ординаторов и студентов-медиков.

Ключевые слова: классификация рака, рак молочной железы, нейронные сети, гистологические микропрепараты

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Волгоградского государственного технического университета в рамках научного проекта № 60/473-22.

BREAST CANCER HISTOPATHOLOGY CLASSIFICATION USING NEURAL NETWORKS

Sasov Dmitry A., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

master's student, ORCID: 0009-0008-7950-1073, e-mail: s-dima29@yandex.ru

Zubkov Alexander V., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0003-0425-5695, e-mail: Zubkov.Alexander.v@gmail.com

Dorofeev Nikita A., Volgograd State Medical University, 1 Square of Fallen Fighters, Volgograd, 400131, Russian Federation,

Junior Researcher, ORCID: 0000-0003-2679-7524, e-mail: dorofeev.na@mail.ru

Orlova Julia A., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Head of Department, ORCID: 0000-0003-4854-7462, e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Frolov Maxim Yu., Volgograd State Medical University, 1 Square of Fallen Fighters, Volgograd, 400131, Russian Federation,

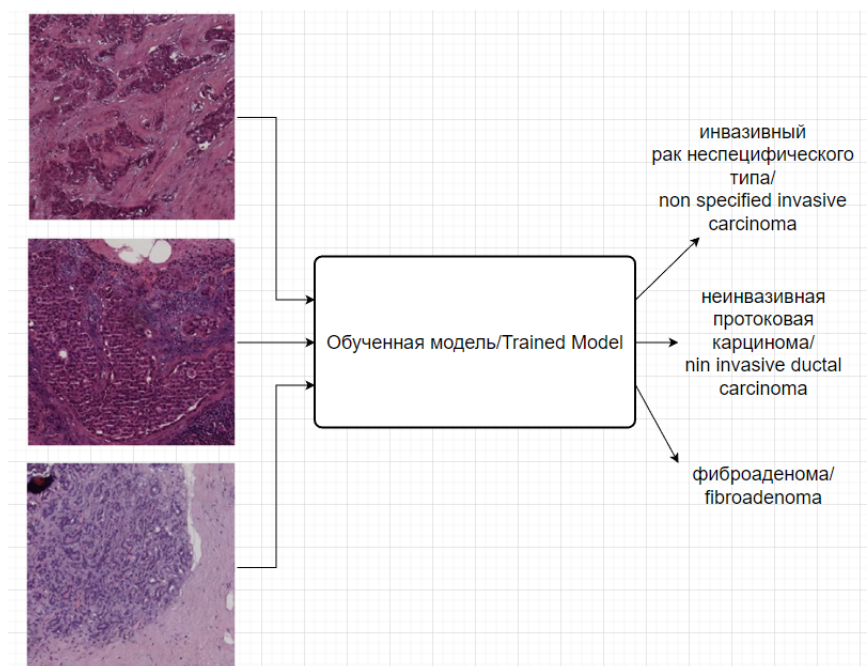
Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-0389-560X, e-mail: clinpharmrussia@yandex.ru

This paper considers the modern classification methods of breast cancer histopathology. The article also represents the most popular neural network architectures with high performance in binary and multiclass classification of breast cancer histopathology. We used a part of a large Russian breast cancer dataset, which contains 6050 images with a resolution of 300x300 and a magnification of x4, as a dataset for model training and testing. The classes were unbalanced in the dataset, so we applied augmentation methods for class equalization, such as flipping and rotation. The following pre-trained models were chosen for training: ResNet 152, DenseNet 121, and Inception_resnet_v2. They had excellent performance, reaching accuracy in the range of 0.9708 to 0.9912. As a result, we achieved higher accuracy than the control study. The results of our paper will be used in future advanced testing of models in breast cancer classification tasks. High performance in future advanced testing will provide the opportunity to use trained models in decision support systems for pathologists and medical students.

Keywords: cancer classification, breast cancer, neural networks, histopathology

Financial support: the reported study was funded by Volgograd State Technical University according to the research project no. 60/473-22.

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Рак молочной железы занимает одну из лидирующих позиций по распространённости и смертности среди женщин в мире по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). Согласно статистическим данным ВОЗ, смертность от этого типа рака только за 2020 год составила 685000 случаев, а диагностирован данный тип рака был у 2,3 миллиона женщин [1]. В России вопрос рака молочной железы также стоит очень остро. Рак молочной железы занимает первое место среди всех злокачественных образований среди женского населения по распространённости (21,2 %) и смертности (15,9 %) [2].

Есть множество классических методов диагностики рака молочной железы. Их суть заключается в анализе врачом результатов маммографии, магнитно-резонансной томографии (МРТ), позитронно-эмиссионной томографии, термографии [3, 4, 5, 6]. Эти тесты могут обнаружить аномалии в молочной железе, которые могут указывать на рак. Если обнаружено отклонение от нормы, может быть выполнена биопсия, для взятия образца ткани из подозрительной области для проведения цитологического и/или патологоанатомического исследования [7].

Рак молочной железы представляет собой сложное заболевание. Опухоли с разными генетическими сигнатурами различаются по прогнозу и могут по-разному реагировать на лечение [8]. Врачи часто используют дополнительные исследования для обнаружения и диагностики рака молочной железы, такие как маммография, УЗИ, МРТ и биопсия [9].

Гистологическое исследование является важным инструментом в диагностике и лечении рака молочной железы. Патоморфологические характеристики опухоли включают целый ряд пунктов: гистотип, характер роста, степень дифференцировки, наличие лимфоваскулярной и периневральной инвазии, а также многие другие [10, 11]. Гистологическое разнообразие аденокарцином молочной железы давно привлекало патологоанатомов, которые выявили специфические морфологические

и цитологические паттерны, последовательно связанные с отличительными архитектурными паттернами, цитологическими особенностями и иммуногистохимическими профилями. Все эти различия имеют в своей основе наборы генетических и эпигенетических aberrаций, которые определяют не только их морфологические особенности, но и клиническое поведение [10].

Патологоанатомическое исследование является золотым стандартом диагностики рака молочной железы. Данный метод требует качественного взятия, хранения и обработки материала, а также изготовления микропрепаратов [12]. Одним из наиболее известных прогностических факторов при раке молочной железы является гистологическая степень дифференцировки, которая представляет собой морфологическую оценку аномалии опухоли – степени её отличия от нормальной ткани. Гистологическая классификация важна для определения прогноза заболевания, так как во многом отражает агрессивность его течения [11].

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА МИКРОФОТОГРАФИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ В НОРМЕ И ПАТОЛОГИИ

В последние годы были разработаны системы компьютерной диагностики для снижения стоимости и повышения эффективности патологоанатомических исследований. За принятие решения в этих системах часто отвечают нейронные сети разных видов (в том числе и свёрточные нейронные сети). Основными задачами для нейронных сетей выступают бинарная и многоклассовая классификации. В современных исследованиях, благодаря доступности мощных вычислительных устройств, используют свёрточные нейронные сети, которые позволяют подавать для классификации в нейронную сеть изображения без предварительного выделения признаков [13].

На данный момент есть множество архитектур свёрточных нейронных сетей AlexNet, ResNet, Inception, DenseNet, Xception, VGG, MobileNet. Некоторые из этих архитектур довольно часто встречаются в задачах анализа изображений медицинской тематики [14].

Inception и ResNet – две популярные архитектуры глубокого обучения, используемые для гистологической классификации и сегментации рака молочной железы [15, 16, 17]. В другом исследовании при голосовании по нескольким моделям с использованием Xception и Inception ResNet v2 в качестве базовых моделей точность классификации по 4 классам составила 95 %, а точность классификации по 2 классам – 98,75 % [16].

В работе [18] авторы создали свою архитектуру свёрточной нейронной сети BHCNet (breast cancer histopathological image classification network) с использованием свёрточного модуля SE-Res Net. Модель BHCNet-3 достигла наивысшей accuracy = 99,34 %, recall = 99,16 %, f-measure = 99,28 %, AUC = 99,96 % для бинарной классификации и accuracy = 94,43 %, precision = 95,25 %, recall = 95,55 %, f-measure = 95,39 %, AUC = 99,78 % для многоклассовой классификации на датасете BraKHis. К данным была применена аугментация для уравнивания классов.

В другом исследовании, авторы смогли достичь очень высоких показателей с помощью сети Inception_ResNet_V2 в задаче диагностики рака молочной железы путем анализа гистопатологических изображений [15]. Обучение модели проходило на датасете BraKHis. К данным, как и в предыдущем исследовании, применялись разные методы аугментации. В бинарной классификации Inception_resnet_v2 достигла accuracy = 97,90%, F1-score = 98,47%, а Inception_v3 достигла accuracy = 96,84%, F1-score = 97,70%. В многоклассовой классификации Inception_resnet_v2 также показала более хорошие результаты, чем Inception_v3. С помощью аугментации удалось улучшить такие показатели Inception_resnet_v2, как accuracy, precision, recall, F1-score, на величину от 1,2 до 3% для бинарной классификации, а для многоклассовой классификации удалось добиться улучшений на 12,39 % для accuracy и на 19,04 % для macro F1-score.

В исследовании, опубликованном в журнале Nature, был проведен анализ производительности семи моделей (EfficientNetB0, EfficientNetV2B0, EfficientNetV2B0-21k, Resnet50V1, Resnet50V2, MobileNetV1, MobileNetV2) в многоклассовой классификации рака молочной железы на основе набора данных «Четыре степени рака молочной железы» (FBCG). Наивысшими показателями обладали модели MobileNetV1, EfficientNetV2B0-21k и EfficientNetB0, их показатели accuracy, macro recall, macro precision, macro F1-score для мультиклассификации составили около 95% [19].

В работе, опубликованной в NCBI, сравнивается эффективность различных моделей CNN (convolution neural networks) с моделью архитектуры DenseNet на различных наборах данных. Один из них, BraKHis, содержит гистопатологические изображения рака молочной железы. Модель была обучена с помощью подхода transfer learning. Показано, что предложенный метод DenTnet превосходит другие модели CNN в accuracy, recall, F1-score и AUC [20].

Ещё в одном исследовании был предложен фреймворк «MultiNet», основанный на трансферном обучении, для классификации различных типов рака молочной железы с использованием двух общедоступных наборов данных BreakHis и ICIAR. Наиболее важным преимуществом является то, что структура «MultiNet» почти по всем показателям обогнала другие модели, такие как DenseNet201, NasNetMobile, VGG-16, VGG-19, MobileNet, ResNet-50 и Xception как в бинарной классификации, так и в многоклассовой. Некоторые метрики достигли отметки в 100 % [21].

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования в качестве данных для обучения будет выступать часть датасета, представленного в работе [22]. Авторам, предоставившим этот датасет, удалось достигнуть очень хороших показателей ассигасу для изображений с увеличением $\times 10$, так как этих изображений было достаточно для обучения предобученных моделей. Однако на изображениях с увеличением $\times 4$ дела обстояли значительно хуже, также стоит добавить, что была приведена только 1 метрика – ассигасу, которая не даёт полного понимания, насколько хорошо обучились модели, так как изображения были неравномерно распределены по классам.

Целью нашего исследования является добавление новых метрик для оценки качества обучения моделей и улучшение показателей ассигасу на изображениях с разрешением 300×300 и увеличением $\times 4$.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- выбрать подходящие способы аугментации данных;
- аугментировать данные в контрольном датасете;
- обучить модели на контрольном и аугментированном датасете;
- оценить качество обучения моделей и выбрать лучшую.

ОПИСАНИЕ НАБОРА ДАННЫХ

Используемый набор данных содержит изображения гистологических микропрепаратов молочной железы с разными увеличениями ($\times 4$ и $\times 10$) и разным разрешением (300×300 и 500×500). Распределение указано в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение изображений в датасете по увеличению и разрешению

Разрешение/увеличение	$\times 4$	$\times 10$
300×300	6730	23235
500×500	3049	9890

Данные классифицированы по нескольким показателям: характер поражения (benign, in situ, invasive), морфологический тип поражения (инвазивный рак неспецифического типа – CR, крибриформный рак – Cribr_Cr, неинвазивная протоковая карцинома – DCIS, фибroadенома – FA, фиброзно-кистозные изменения – FCD, дольковый инвазивный рак – Lob_CR, медуллярный рак – Medul_CR, микропапиллярный рак – Micrap_CR, муцинозный рак – Muc_CR, папиллярный рак – Pap_CR, папиллома – Papilloma), степень дифференцировки (G0, G1, G2, G3). Распределение изображений по классам неравномерное. Примеры изображений разных классов в разрешении 300×300 пикселей и увеличением в 4 раза приведены на рисунке 1.

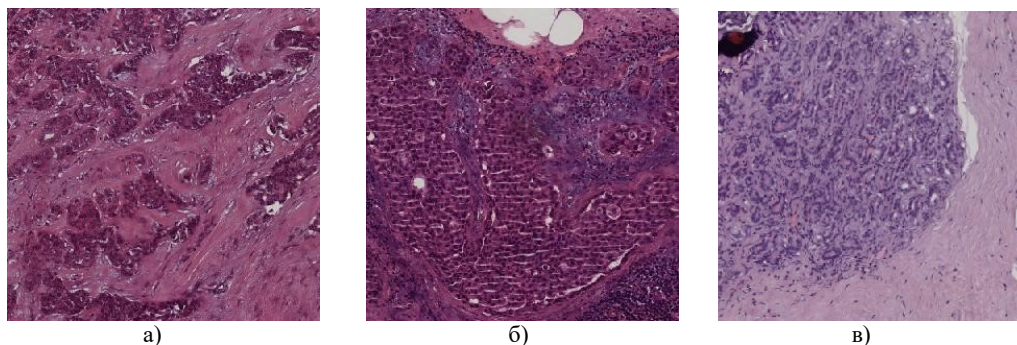


Рисунок 1 – Примеры изображений гистологических микропрепаратов молочной железы: а) инвазивный рак неспецифического типа; б) неинвазивная протоковая карцинома; в) фибroadенома

В данной работе в качестве контрольного датасета выступают изображения с увеличением $\times 4$ и разрешением изображений 300×300 пикселей. Применены следующие приёмы аугментирования: поворот изображения на 90, 180, 270 градусов, отражение изображения по вертикали и горизонтали. Аугментация применялась только для уравнивания количества изображений в классах. Для аугментации были выбраны только те способы, которые не поменяли бы семантику изображений.

Для классификации, как и в работе [22], выбраны 6 классов: CR, DCIS, FA, FCD, Lob_CR, Papilloma. В таблице 2 приведено распределение данных по классам с учётом аугментации и без, а также общее количество изображений.

Таблица 2 – Распределение используемых данных по морфологическому типу поражения

Морфологический тип поражения	test	fit + valid	total	test augmented	fit + valid augmented	total augmented
CR	368	2088	2456	368	2088	2456
DCIS	32	182	214	385	2183	2568
FA	162	923	1085	375	2125	2500
FCD	110	629	739	333	1884	2217
Lob CR	150	855	1005	370	2095	2465
Papilloma	82	469	551	330	1874	2204

Для неаугментированных данных в тестовый набор отбиралось 15 % изображений случайным образом. Для аугментированных данных в тестовый набор данных попадали только неаугментированные данные, если их хватало (т. е. они составляли не менее 15 % от общего количества данных), иначе в тестовый набор случайным образом добавлялось столько аугментированных данных, сколько нужно до 15 %. В обоих случаях из оставшихся данных 15 % попадали в набор для валидации, а остаток – в тренировочный набор.

ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

В данной работе будут рассмотрены 3 модели, относящиеся к архитектурам, которые довольно часто мелькают в других исследованиях и показывают отличные результаты в анализе гистологических изображений рака молочной железы: ResNet 152, DenseNet 121, Inception_ResNet_v2. Все модели были предобучены на наборе данных ImageNet и взяты из фреймворка PyTorch с изменением лишь выходного слоя. Для обучения был применён подход transfer learning, так как он позволяет ускорить процесс обучения модели и получить качественно обученную модель.

Для обучения моделей использовался фреймворк PyTorch с вычислениями на видеокарте RTX 2060 с объёмом памяти 6 GB. Для обучения моделей были заданы следующие значения гиперпараметров: batch_size = 8 (из-за ограничений по видеопамати), epoches = 20, learning_rate = 0,001, gamma = 0,1, step_size = 8. В качестве оптимизатора был выбран Adam, а функция ошибки – cross-entropy loss.

Для неаугментированного датасета была применена k-fold стратифицированная кросс-валидация с k = 20, стратификация применялась, так как классы не были сбалансированы. Для аугментированного датасета применялась k-fold кросс-валидация с k = 20, но без стратификации.

В процессе обучения после каждой эпохи фиксировались значения следующих метрик: train и validation loss, accuracy, macro average precision (далее macro avg precision), macro average recall (далее macro avg recall), macro average F1-score (далее macro avg F1). Лучшие веса моделей определялись по macro avg precision для неаугментированного датасета и по macro avg F1 для аугментированного датасета. Для вычисления метрик использовалась библиотека scikit-learn. В таблице 3 указаны лучшие метрики loss, macro avg precision и macro avg F1 по итогам обучения для валидационного набора данных. Наиболее хорошие результаты на валидационных данных показала модель Inception_resnet_v2 с наилучшими macro avg precision = 0,9995 и macro avg F1 = 0,9984.

Таблица 3 – Лучшие метрики loss, macro avg precision и macro avg F1 для validation данных по итогам обучения

Модель	Best loss	Best macro avg precision	Best loss (augmented)	Best macro avg F1 (augmented)
ResNet 152	0,0438	0,9743	0,0334	0,9924
Inception_resnet_v2	0,0035	0,9995	0,0243	0,9984
DenseNet 121	0,0340	0,9906	0,0369	0,9919

Также во время обучения проводились замеры по времени. В таблице 4 приведено время обучения для каждой модели. По этому показателю лучше себя проявила модель DenseNet 121, которая обучилась на аугментированных данных примерно за 70 минут, а на неаугментированных за 31 минуту, что почти в 2 раза быстрее, чем Inception_resnet_v2 и ResNet 152.

Таблица 4 – Время обучения моделей

Аугментация	ResNet 152	Inception_resnet_v2	DenseNet 121
Да	157m 41s	135m 12s	70m 21s
Нет	66m 14s	60m 25s	31m 13s

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

В процессе тестирования обученных моделей измерялись те же метрики, что и в процессе обучения. В таблице 5 приведены результаты тестирования моделей. По метрикам на тестовых данных Inception_resnet_v2 показала себя лучше остальных моделей как на аугментированном датасете, так

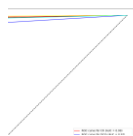
и на неаугментированном. Лучшей модели удалось достичь accuracy = 0,9912, macro avg precision (для аугментированных данных) = 0,9883, macro avg recall (для аугментированных данных) = 0,9872, macro avg F1 (для аугментированных данных) = 0,9875. Модели DenseNet 121 и ResNet 152 имеют более близкие показатели, однако на обучение первой модели требуется в 2 раза меньше времени.

Таблица 5 – Метрики для обученных моделей на тестовых данных

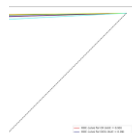
Показатель	ResNet 152	Inception_resnet_v2	DenseNet 121
Accuracy	0,9835	0,9912	0,9857
Macro avg precision	0,9674	0,9835	0,9753
Macro avg recall	0,9766	0,9833	0,9883
Macro avg F1	0,9718	0,9832	0,9815
Accuracy (augmented)	0,9759	0,9875	0,9708
Macro avg precision (augmented)	0,9768	0,9883	0,9719
Macro avg recall (augmented)	0,9753	0,9872	0,9716
Macro avg F1 (augmented)	0,9758	0,9875	0,9717

Что же касается аугментации данных, в данном случае она не принесла значительных улучшений, а в некоторых случаях даже ухудшила метрики.

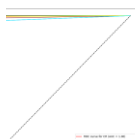
Также для оценки качества обучения использовалась метрика ROC-AUC score. На рисунке 2 показаны ROC-кривые для обученных моделей.



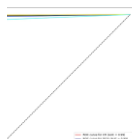
а)



б)



в)



г)

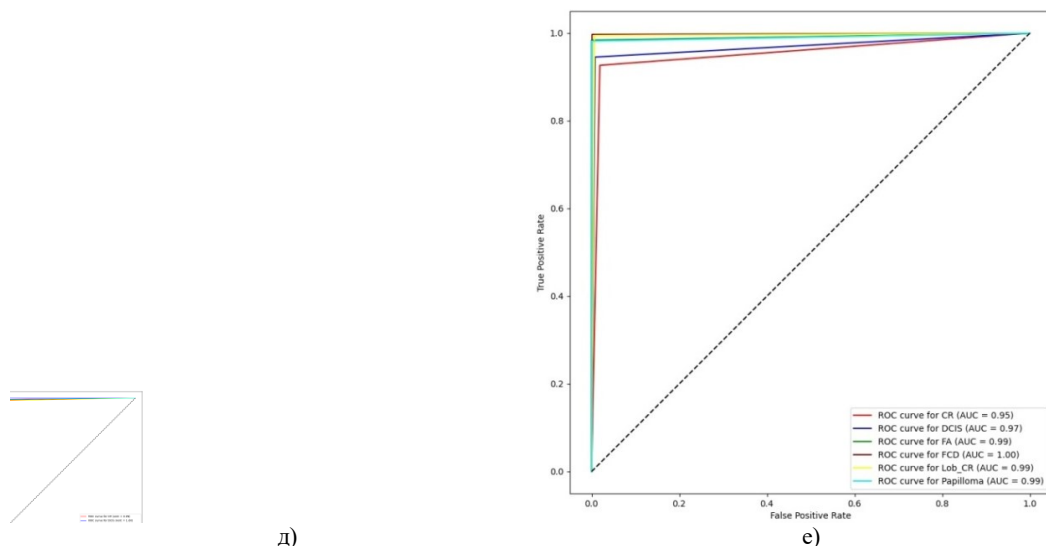


Рисунок 2 – ROC-кривые для обученных моделей

На рисунках 2а, в, д изображены ROC-кривые для моделей ResNet 152, Inception_resnet_v2 и DenseNet 121 соответственно, протестированных на неаугментированных данных, а на 2б, г и е – для моделей, протестированных на аугментированных данных. На некоторых графиках показатель ROC AUC score был очень близок к 1, что свидетельствует об отличной способности модели отделять один класс от остальных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью более мощных моделей и аугментации данных удалось достичь улучшения ассурасу для набора 300x300 пикселей с увеличением x4 по сравнению с результатами исследования [22] для того же набора данных, причём большую роль сыграло именно добавление более мощных моделей. Наименьший показатель ассурасу среди всех моделей составил 0,9708 (DenseNet 121), а наивысший – 0,9912 (Inception_resnet_v2), остальные показатели варьируются от 0,9674 до 0,9912, также стоит отметить отличную способность отделять классы друг от друга, о чём свидетельствуют высокие показатели precision и ROC-кривые.

В дальнейших исследованиях планируется представить собственный размеченный датасет с 4596 изображениями гистологических микропрепаратов молочной железы в разрешении 1920x1440 пикселей. Датасет будет классифицирован по морфологическому типу опухоли и по её характеру.

После проведения более расширенного тестирования моделей лучшую из них планируется добавить в систему поддержки принятия решений для врачей-патологоанатомов, ординаторов и студентов-медиков.

Список источников

1. Wild, C. P. World Cancer Report: Cancer Research for Cancer Prevention / C. P. Wild, E. Weiderpass, B. W. Stewart. – Lyon : International Agency for Research on Cancer, 2020. – 611 p.
2. Мерабишвили, В. М. Состояние онкологической помощи в России: рак молочной железы среди женского населения. Заболеваемость, смертность, достоверность учета, детальная локализационная и гистологическая структура. (Популяционное исследование на уровне федерального округа) / В. М. Мерабишвили // Вопросы онкологии. – 2022. – Т. 68, № 3. – С. 286–293.
3. Ganesan, K. Computer-aided breast cancer detection using mammograms: A review / K. Ganesan, U. R. Acharya, C. K. Chua, L. C. Min, K. T. Abraham, K. H. Ng // IEEE Reviews in Biomedical Engineering. – 2013. – Vol. 6. – P. 77–98.
4. Zheng, Y. Breast cancer detection with Gabor features from digital mammograms / Y. Zheng // Algorithms. – 2010. – Vol. 3, № 1. – P. 44–62.
5. Fleet, B. D. Breast cancer detection using haralick features of images reconstructed from ultra wideband microwave scans / B. D. Fleet, J. Yan, D. B. Knoester, M. Yao, J. R. Deller, E.D. Goodman // Clinical Image-Based Procedures. Translational Research in Medical Imaging. – 2014. – Vol. 8680. – P. 9–16.
6. Tan, M. Association between changes in mammographic image features and risk for near-term breast cancer development / M. Tan, B. Zheng, J. K., Leader, D. Gur // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2016. – Vol. 35, № 7. – P. 1719–1728.
7. American Cancer Society. – URL: <https://www.cancer.org/cancer/breast-cancer/screening-tests-and-early-detection.html> (дата обращения: 05.04.2023).
8. Haas, J. S. The Complexity of Achieving the Promise of Precision Breast Cancer Screening / J. S. Haas // Journal of the National Cancer Institute. – 2017. – Vol. 109, № 5.

9. Centers of Disease Control and Prevention. – URL: https://www.cdc.gov/cancer/breast/basic_info/diagnosis.htm (дата обращения: 05.04.2023).
10. Weigelt, B. Histological types of breast cancer: how special are they? / B. Weigelt, F. C. Geyer, J. S. Reis-Filho // *Molecular oncology*. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 192–208.
11. Rakha, E. A. Breast cancer prognostic classification in the molecular era: the role of histological grade / E. A. Rakha, J. S. Reis-Filho, F. Baehner et al // *Breast cancer research: BCR*. – 2010. – Vol. 12. – P. 207.
12. Rulaningtyas, R. Histopathology Grading Identification of Breast Cancer Based on Texture Classification Using GLCM and Neural Network Method / R. Rulaningtyas, A. Hyperastuty, A. Rahaju // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1120. – P. 012050.
13. Araújo, T. Classification of breast cancer histology images using Convolutional Neural Networks / T. Araújo et al // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12, № 6. – P. e0177544.
14. Different types of CNN models. – URL: <https://iq.opengenus.org/different-types-of-cnn-models/> (дата обращения: 05.04.2023).
15. Xie, J. Deep learning based analysis of histopathological images of breast cancer / J. Xie et al // *Frontiers in Genetics*. – 2019. – Vol. 10. – P. 80.
16. Bagchi, A. A Multi-Stage Approach to Breast Cancer Classification Using Histopathology Images / A. Bagchi, P. Pramanik, R. Sarkar // *Diagnostics*. – 2023. – Vol. 13, № 1. – P. 126.
17. Gupta, K. Analysis of Histopathological Images for Prediction of Breast Cancer Using Traditional Classifiers with Pre-Trained CNN / K. Gupta, N. Chawla // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 167. – P. 878–889.
18. Jiang, Y. Breast cancer histopathological image classification using convolutional neural networks with small SE-ResNet module / Y. Jiang et al // *PLoS One*. – 2019. – Vol. 14, № 3. – P. e0214587.
19. Voon, W. Performance analysis of seven Convolutional Neural Networks (CNNs) with transfer learning for Invasive Ductal Carcinoma (IDC) grading in breast histopathological images / W. Voon et al // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – P. 19200.
20. Wakili, M. A. Classification of Breast Cancer Histopathological Images Using DenseNet and Transfer Learning / M. A. Wakili et al // *Comput. Intell. Neurosci*. – 2022. – Vol. 2022. – P. 8904768.
21. Saikat, I. K. MultiNet: A deep neural network approach for detecting breast cancer through multi-scale feature fusion / I. K. Saikat et al. // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. – 2022. – Vol. 34, № 8. – P. 6217–6228.
22. Борбат, А. М. Первый российский набор данных гистологических изображений патологических процессов молочной железы / А. М. Борбат, С. В. Лищук // *Врач и информационные технологии*. – 2020. – № 3. – С. 25–30.

References

1. Wild, C. P., Weiderpass, E., Stewart, B. W. World Cancer Report: Cancer Research for Cancer Prevention. Lyon, International Agency for Research on Cancer, 2020. 611 p.
2. Merabishvili, V. M. Sostoyanie onkologicheskoy pomoshchi v Rossii: rak molochnoy zhelezy sredi zhenskogo naseleniya. Zabolevaemost, smertnost, dostovernost ucheta, detalnaya lokalizatsionnaya i gistologicheskaya struktura. (Populyatsionnoe issledovanie na urovne federalnogo okruga) [The state of cancer care in Russia: breast cancer among the female population. Morbidity, mortality, reliability of accounting, detailed localization and histological structure. (Population study at the federal district level)]. *Voprosy onkologii*, 2022, no. 68 (3), pp. 286–293.
3. Ganesan, K., Acharya, U. R., Chua, C. K., Min, L. C., Abraham, K. T., Ng, K. H. Computer-aided breast cancer detection using mammograms: A review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2013, no. 6, pp. 77–98.
4. Zheng, Y. Breast cancer detection with Gabor features from digital mammograms. *Algorithms*, 2010, no. 3 (1), pp. 44–62.
5. Fleet, B. D., Yan, J., Knoester, D. B., Yao, M., Deller, J. R., Goodman, E. D. Breast cancer detection using haralick features of images reconstructed from ultra wideband microwave scans. *Clinical Image-Based Procedures. Translational Research in Medical Imaging*, 2014, vol. 8680, pp. 9–16.
6. Tan, M., Zheng, B., Leader, J. K., Gur D. Association between changes in mammographic image features and risk for near-term breast cancer development. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2016, vol. 35 (7), pp. 1719–1728.
7. American Cancer Society. Available at: <https://www.cancer.org/cancer/breast-cancer/screening-tests-and-early-detection.html> (accessed 05.04.2023).
8. Haas, J. S. The Complexity of Achieving the Promise of Precision Breast Cancer Screening. *Journal of the National Cancer Institute*, 2017, vol. 109, no. 5.
9. Centers of Disease Control and Prevention. Available at: https://www.cdc.gov/cancer/breast/basic_info/diagnosis.htm (accessed 05.04.2023).
10. Weigelt, B., Geyer, F. C., Reis-Filho, J. S. Histological types of breast cancer: how special are they? *Molecular oncology*, 2010, no. 4 (3), pp. 192–208.
11. Rakha, E. A., Reis-Filho, J. S., Baehner, F., Dabbs, D. J., Decker, T., Eusebi, V., Fox, S. B., Ichihara, S., Jacquemier, J., Lakhani, S. R., Palacios, J., Richardson, A. L., Schnitt, S. J., Schmitt, F. C., Tan, P. H., Tse, G. M., Badve, S., Ellis, I. O. Breast cancer prognostic classification in the molecular era: the role of histological grade. *Breast cancer research: BCR*, 2010, vol. 12, no. 4, p. 207.
12. Rulaningtyas R, Hyperastuty A, Rahaju A. Histopathology grading identification of breast cancer based on texture classification using GLCM and neural network method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1120, p. 012050.

13. Araújo, T., Aresta, G., Castro, E., Rouco, J., Aguiar, P., Eloy, C., Polónia, A., Campilho, A. Classification of breast cancer histology images using Convolutional Neural Networks. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 6, p. e0177544.
14. *Different types of CNN models*. Available at: <https://iq.opengenus.org/different-types-of-cnn-models/> (accessed 05.04.2023).
15. Xie, J., Liu, R., Luttrell, J., Zhang, C. Deep learning based analysis of histopathological images of breast cancer. *Frontiers in Genetics*, 2019, vol. 10, p. 80.
16. Bagchi, A., Pramanik, P., Sarkar, R. A Multi-Stage Approach to Breast Cancer Classification Using Histopathology Images. *Diagnostics*, 2023, vol. 13, no. 1, p. 126.
17. Gupta, K., Chawla, N. Analysis of Histopathological Images for Prediction of Breast Cancer Using Traditional Classifiers with Pre-Trained CNN. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 167, pp. 878–889.
18. Jiang, Y., Chen, L. Zhang, H., Xiao, X. Breast cancer histopathological image classification using convolutional neural networks with small SE-ResNet module. *PLoS One*, 2019, vol. 14, no. 3, p. e0214587.
19. Voon, W., Hum, Y., Tee, Y., Yap, W. S., Salim, M., Tan, T., Mokayed, H., Lai, K. W. Performance analysis of seven Convolutional Neural Networks (CNNs) with transfer learning for Invasive Ductal Carcinoma (IDC) grading in breast histopathological images. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, p. 19200.
20. Wakili, M. A., Shehu, H. A., Sharif, M. H., Sharif, M. H. U., Umar, A., Kusotogullari, H., Ince, I. F., Uyaver, S. Classification of Breast Cancer Histopathological Images Using DenseNet and Transfer Learning. *Comput. Intell. Neurosci.*, 2022, vol. 2022, p.8904768.
21. Saikat, I. K., Ashef, S., Razaul, K., Mahmodul, H., Anichur, R. MultiNet: A deep neural network approach for detecting breast cancer through multi-scale feature fusion. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2022, vol. 34, no. 8, pp. 6217–6228.
22. Borbat, A. M., Lishchuk, S. V. Pervyy rossiyskiy nabor dannykh gistologicheskikh izobrazheniy patologicheskikh protsessov molochnoy zhelezy [The first Russian breast pathology histologic images data set]. *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [Medical doctor and information technologies], 2020, vol. 3, pp. 25–30.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 02.05.2023.

The article was submitted 13.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 02.05.2023.

УДК 004.415

НЮАНСЫ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИКАСПИЙСКИХ РЕГИОНОВ

Демина Раиса Юрьевна, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, ORCID: 0009-0009-1615-5641, e-mail: raisa.demina.91@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

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

Богатые природные запасы, стратегическое положение, логистически энергетические и транспортные артерии в совокупности представляют Прикаспийский регион как уникальную геополитически важную территорию для близлежащих государств. Обеспечение стабильности и безопасности данного региона является жизненно важными интересами для России. Для объединения подходов к оценке и управлению комплексной безопасностью региона была разработана методика, позволяющая строить модели для различных аспектов обеспечения комплексной безопасности региона. Большое количество взаимосвязанных концептов и необходимость снизить вероятность ошибки вычислений, связанной с человеческим фактом, привели к необходимости разработки программного обеспечения, автоматизирующего расчёт комплексной оценки уровня безопасности. В рамках статьи приведена диаграмма вариантов использования, иллюстрирующая возможность различных способов задания модели безопасности региона. Приведена блок-схема расчёта оценки уровня безопасности региона, представляющей собой рекурсивную функцию. Рассмотрен пример расчёта уровня экологической безопасности региона и пример моделирования ситуации, влияющей на экологическую безопасность.

Ключевые слова: комплексная безопасность, программное обеспечение, уровень безопасности, оценка уровня безопасности, нечёткие когнитивные модели

Финансирование: 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».

NUANCES OF THE PROGRAM IMPLEMENTATION OF THE METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE LEVEL OF SECURITY OF THE CASPIAN REGIONS

Demina Raisa Yu., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0009-0009-1615-5641, e-mail: raisa.demina.91@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

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

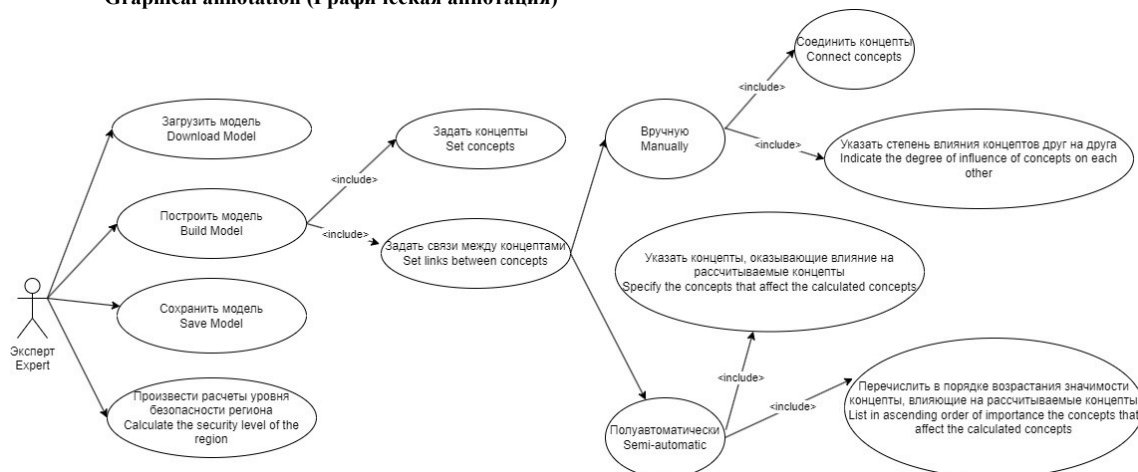
undergraduate student, ORCID: 0000-0002-2472-9248, e-mail: koryakova-01@mail.ru

Rich natural resources, strategic position, logistical energy and transport arteries together represent the Caspian region as a unique geopolitically important territory for neighboring states. Ensuring the stability and security of this region is a vital interest for Russia. To combine approaches to the assessment and management of the region's integrated security, a methodology has been developed that allows building models for various aspects of ensuring the region's integrated security. A large number of interrelated concepts and the need to reduce the possibility of human error in calculations led to the need to develop software that automates the calculation of a comprehensive assessment of the safety level. Within the framework of the article, a diagram of use cases is provided, illustrating the possibility of various ways of specifying a region security model. A block diagram for calculating the assessment of the region's security level, which is a recursive function, is given. An example of calculating the level of environmental safety in a region and an example of modeling a situation that affects environmental safety are considered.

Keywords: integrated security, software, security level; security level assessment, fuzzy cognitive models

Financial support: the study was supported by a grant of fundamental research projects as part of the implementation of the strategic projects «Development Program of Astrakhan State University for 2021–2030», «Methodological foundations for assessing and managing the level of integrated security in the region».

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Ввиду особой мировой значимости стратегического положения, Каспийский регион выполняет роль связующего звена между Европой, Азией и Ближним Востоком. Регион Каспийского моря является одним из старейших нефтедобывающих регионов мира. Геополитическая значимость Каспийского бассейна, в свою очередь, формируется под влиянием его природных запасов и энергетического потенциала, представляющих повышенный интерес для внерегиональных государств и соседних регионов. Каспийский регион находится на стыке нескольких макрорегионов – Кавказа, Центральной Азии, Ближнего и Среднего Востока. Здесь пересекаются многочисленные международные торгово-транспортные и энергетические коридоры, соединяющие Восток и Запад, Север и Юг, Европу и Азию. Многие аспекты торгово-экономического, инвестиционного, энергетического и транспортно-логистического развития Прикаспийского региона носят трансграничный характер.

Обеспечение комплексной безопасности региона предусматривает работы по следующим направлениям: экологическая безопасность, экономическая безопасность, информационная безопасность, социальная и криминологическая безопасность 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.

Задача обеспечения комплексной безопасности носит разносторонний характер и является многокритериальной, поэтому для оценки её уровня используется целый ряд различных показателей – критериев. Основные критерии безопасности для каждого аспекта можно встретить в методиках, рекомендательно-информативных документах, научных работах [1–5].

В работе [6] была предложена методика, позволяющая объединить подходы к оценке и управлению комплексной безопасностью региона. Общая схема анализа и управления комплексной безопасностью на основе нечёткого когнитивного моделирования в нотации UML показана на рисунке 1.

Предложенная методика была проиллюстрирована на примере построения модели оценки уровня экологической безопасности и уровня социальной стабильности. На первом этапе осуществлялся сбор информации относительно показателей того или иного уровня. Были выбраны критерии. Модель представлена в виде нечеткого графа (рис. 2).

Далее были вычислены веса Фишберна на основании модифицированного метода нестрого ранжирования. Определены значения концептов, при этом данные лингвистических значений были приведены к вербальной форме с помощью шкалы Харрингтона [7]. Затем полученные веса и значения концептов были использованы для расчета количественного показателя для каждого уровня с применением аддитивной свёртки:

$$\bar{K} = \sum_i \alpha_i K_i, \quad (1)$$

где α_i – вес для каждого критерия;

K – значение концепта для каждого критерия.

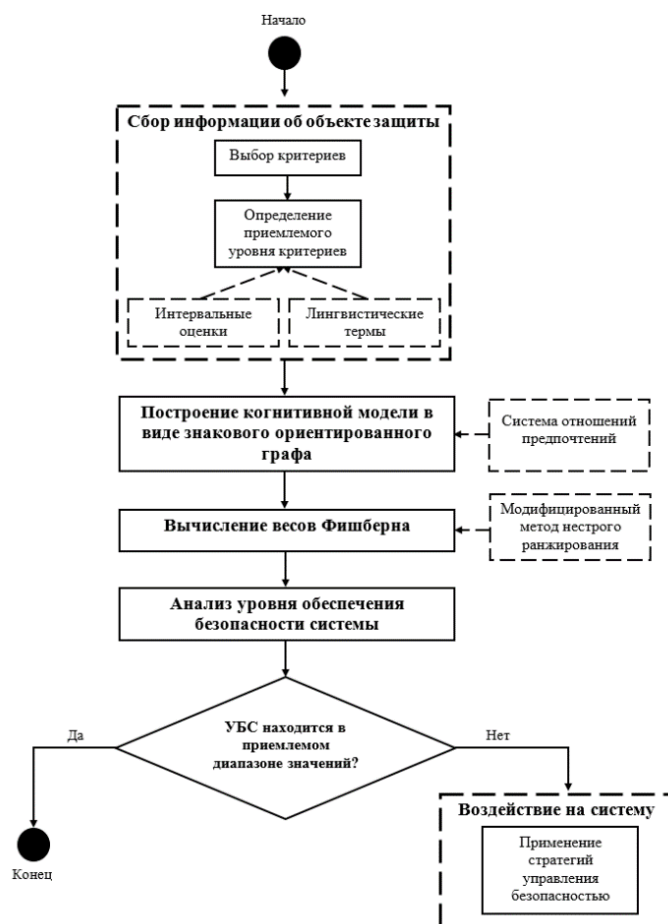


Рисунок 1 – Схема анализа и управления комплексной безопасностью

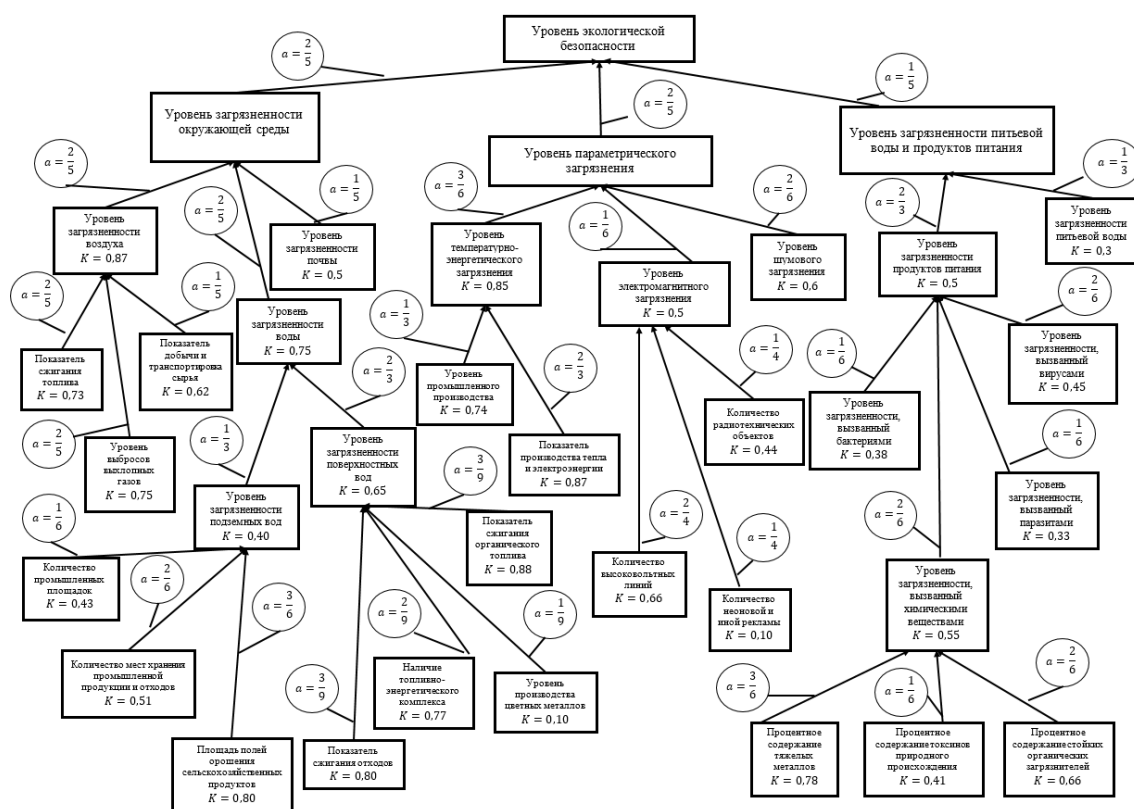


Рисунок 2 – Фрагмент нечёткой когнитивной модели для определения уровня экологической безопасности с весами Фишберна и значениями концептов

По итогу расчёта интегрального показателя уровня экологической безопасности был проведён анализ уровня обеспечения безопасности системы (УБС). С применением шкалы Харрингтона, значение критерия было соотнесено к одному из интервалов шкалы (очень высокий, высокий, средний, низкий, очень низкий). На основании полученного значения можно применять меры, которые позволят снизить степень негативного влияния концептов на критерии экологической безопасности.

Данные этапы методики являются трудоёмкими и затратными, вследствие чего автоматизация таких процессов позволит сократить время вычисления весов, значений концептов и их количественных показателей, а построение когнитивных моделей покажет все причинно-следственные связи между концептами данной предметной области. Поэтому было принято решение разработать программное обеспечение, которое позволило бы проводить оценку состояния региона, на основе построения когнитивных моделей.

ОБЩАЯ СХЕМА РАБОТЫ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

Для автоматизации вычислений, сокращения вероятности ошибки расчётов, а также для упрощения процесса моделирования состояния безопасности региона было принято решение разработать программный продукт, реализующий предложенную методику.

С использованием языка программирования C# и свободно распространяемой библиотеки [8] было разработано WindowsForm-приложение «Программа для оценки состояния безопасности региона» (далее – Приложение).

С использованием интерфейса Приложения (рис. 3) эксперт может задавать необходимые концепты предметной области. Каждый концепт характеризуется двумя основными свойствами: названием и значением. Название кратко отражает суть задаваемого концепта и должно быть уникальным в рамках текущей модели. Значение представляет собой действительное число. Предусмотрено создание концептов двух типов: те, чьи значения рассчитываются автоматически и те, чьи значения задаются вручную. В случае если значение концепта может только рассчитываться автоматически, то эксперту необходимо указать, какие концепты оказывают влияние на данный концепт. В случае если значение концепта только задаётся вручную экспертом, то ему требуется, используя собственный опыт и знания, оценить состояние концепта и поставить ему в соответствие некое действительное число [0; 10]. Эксперт может использовать собственную шкалу внутри указанного диапазона.

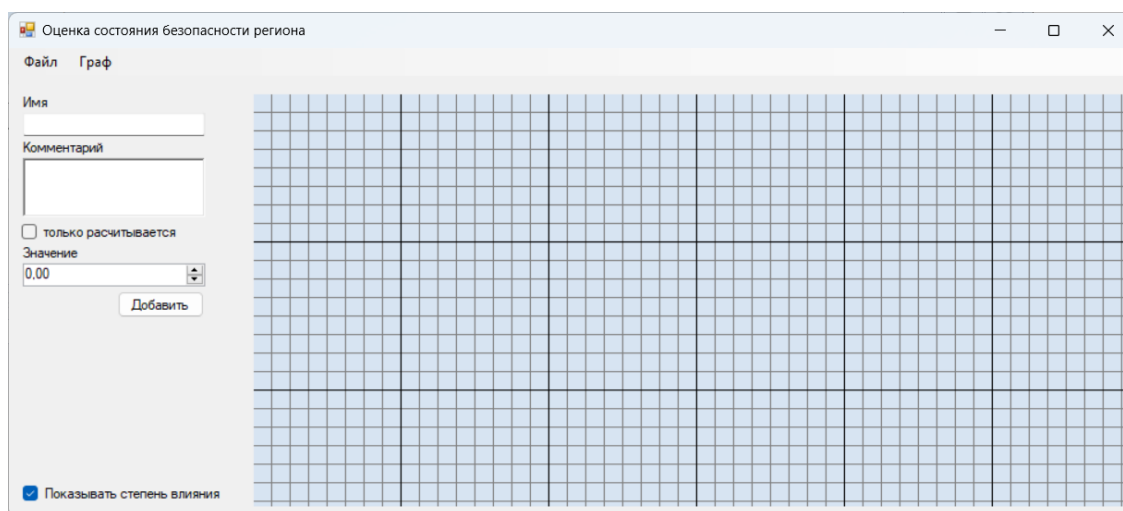


Рисунок 3 – Интерфейс Приложения

После ввода концептов предметной области эксперту необходимо задать связи между концептами и указать степень влияния одного концепта на другой. Существует два способа выполнить данную задачу:

1. Вручную соединить два концепта на интерфейсе основной формы Приложения и задать степень влияния, поставив ей в соответствие действительное число $[-1; 1]$.
2. Для каждого автоматически рассчитываемого концепта задать перечень концептов, которые на него влияют, нестрого проранжировав их в порядке возрастания значимости. В результате будут рассчитаны веса Фишберна, которые и будут отражать степень влияния концептов на рассчитываемый концепт (рис. 4). В данном случае на основной форме связи и рассчитанные степени влияния отразятся автоматически.

Рисунок 4 – Форма расчёта весов Фишберна

Построенная экспертом модель может быть выгружена в xml-файл и в дальнейшем вновь загружена в Приложение для дальнейшей работы.

UML-диаграмма, описывающая основные функции Приложения, представлена на рисунке 5.

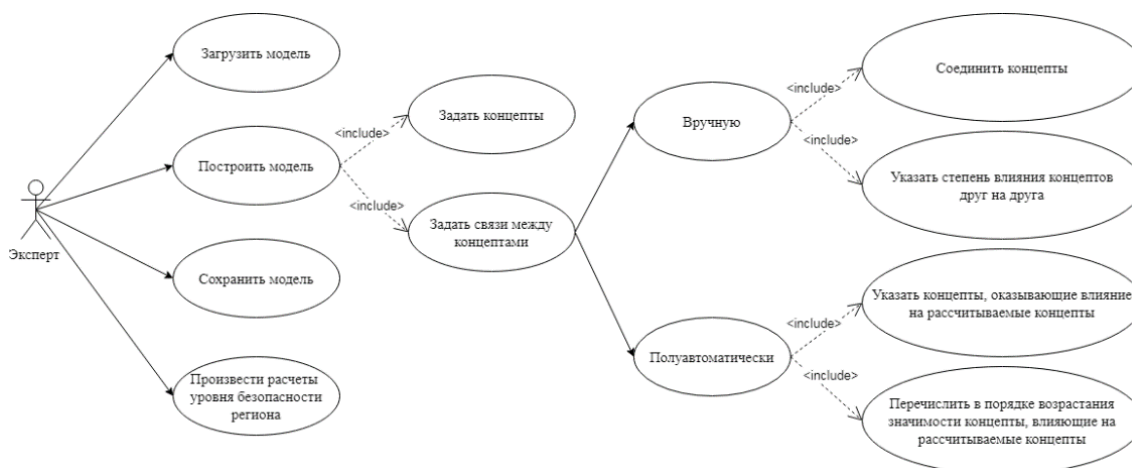


Рисунок 5 – Диаграмма вариантов использования Приложения

После начальных настроек модели необходимо произвести расчёт целевого концепта, на который прямо или косвенно влияют остальные концепты и который комплексно отражает уровень того или иного направления безопасности региона. Целевой концепт определяется автоматически: для его расчёта запускается на выполнение рекурсивная функция расчёта значения концепта. Данная функция будет вызываться для расчёта каждого рассчитываемого концепта до тех пор, пока не будет вызвана для расчёта значения концепта, на который влияют только концепты с задаваемыми значениями. Блок-схема работы рекурсивной функции представлена на рисунке 6.

Изначально на вход функции *CalcConceptValue* подаётся индекс целевого концепта. В дальнейшем при расчёте всего графа эта функция вызывается для каждого концепта, чьё значение рассчитывается. Для расчёта используется формула аддитивной свёртки (1), используемая в методике.

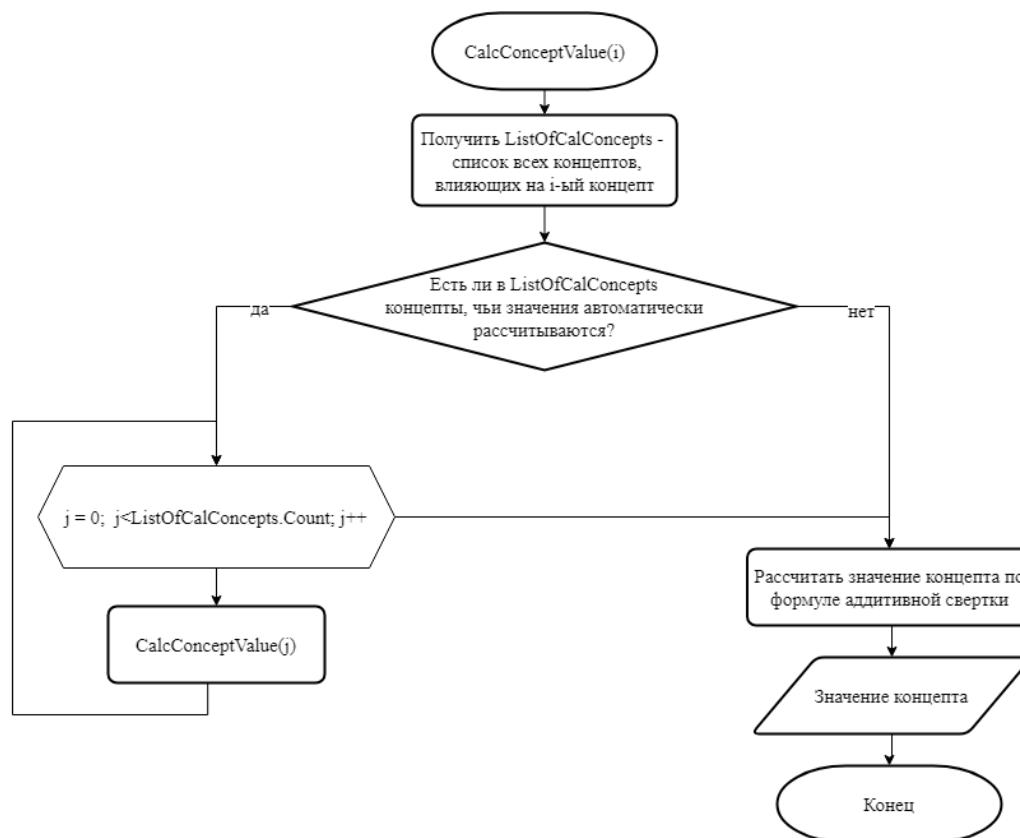


Рисунок 6 – Блок-схема рекурсивной функции расчёта значения концепта

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА УРОВНЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА

В качестве когнитивной модели расчёта экологической безопасности региона была использована модель, показанная на рисунке 2. Данная модель довольно велика, и расчёт целевого концепта для эксперта может стать утомительным процессом.

Экспертом были заданы начальные значения нерасчитываемых концептов и проранжированы концепты, влияющие на рассчитываемые концепты.

На основе данных, приведённых в вышеуказанной работе, в Приложении была создана модель оценки уровня экологической безопасности одного из прикаспийских регионов. Фрагмент данной модели приведён на рисунке 7.

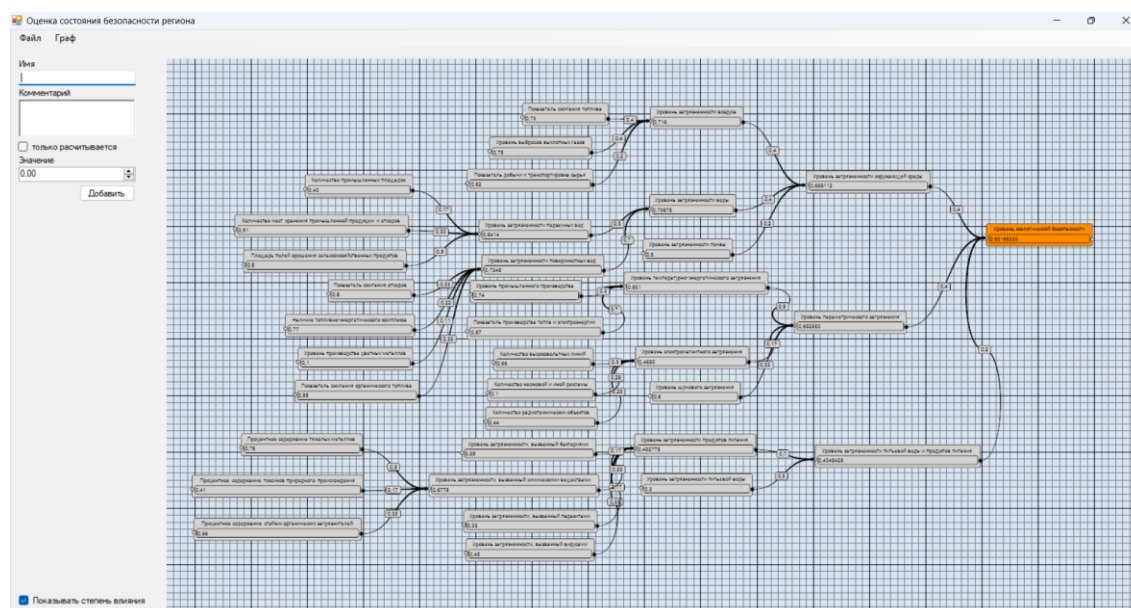


Рисунок 7 – Пример расчёта экологической безопасности региона

В результате расчётов было установлено, что уровень экологической безопасности региона составляет 0,631 по шкале от 0 до 1. Интерпретация полученных результатов остаётся на усмотрение ЛПР.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИТУАЦИЙ

Предположим, в условном регионе планируется расширить территорию сельскохозяйственных угодий. К плюсам подобного решения можно отнести сокращение безработицы и увеличение налоговых отчислений в бюджет. Но также необходимо учитывать, что данное решение может негативно сказаться на экологии, что, в свою очередь, приведёт к сокращению доходов от туризма. Эксперт может оценить, в каких пределах уровень экологической безопасности приемлем для данного региона.

В рамках загруженной модели пользователь может изменить начальное значение концепта «Площадь полей орошаемых сельскохозяйственных угодий» на планируемое (с 0,8 на 0,95) и посмотреть, на сколько изменится значение целевого концепта «Уровень экологической безопасности». После изменения значения концепта «Площадь полей орошаемых сельскохозяйственных угодий» на 0,95 (вместо 0,8) уровень экологической безопасности региона стал равен 0,635 (вместо 0,631). Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемое решение с точки зрения экологической безопасности вполне допустимо.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ

В дальнейшем планируется разработать функционал, который позволил бы эксперту использовать аппарат нечёткой логики для описания значений концептов и для интерпретации результатов. Также представляется целесообразным добавить функционал, связанный с автоматическим конвертированием абсолютных величин в нечёткие переменные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием методики комплексной оценки уровня безопасности прикаспийских регионов полученные результаты на основе формализации экспертных и статистических данных позволяют провести аналитическую работу и предложить меры, направленные на повышение уровня безопасности региона. Расчёт весов Фишберна, значений концептов и построение когнитивных моделей в рамках методики требует комплексного подхода и является трудоёмкой задачей.

Эксперт предметной области при расчёте оценки состояния безопасности региона сталкивается с большим количеством однотипных расчётов, которые сложно автоматизировать с использованием классических приложений. Ручной расчёт чреват наличием ошибок в расчётах, связанных с человеческим фактором. В связи с этим было принято решение о разработке программного обеспечения, которое бы позволило автоматизировать расчёты, а также выполнять процедуру моделирования различных ситуаций и оценке их последствий.

В рамках статьи описаны текущие возможности разработанного приложения и планируемый к добавлению функционал, который может добиться повышения гибкости и точности модели. Представленная диаграмма вариантов использования демонстрирует доступность нескольких способов задания модели экспертом. Приведённая блок-схема рекурсивной функции иллюстрирует способ расчёта целевого концепта.

Разработанный программный продукт позволил произвести расчёт экологической безопасности Прикаспийского региона с меньшими усилиями со стороны эксперта.

Список источников

1. Рошупкина, А. А. Система региональных показателей экономической безопасности / А. А. Рошупкина, Т. В. Сидорина // Вестник евразийской науки. – 2019. – № 3.
2. Сарайкин, Ю. В. Показатели и критерии оценки социальной безопасности региона. Статистический аспект / Ю. В. Сарайкин // Вестник Волжского университета имени В. Н. Татищева. – 2010. – № 19. – С. 63–65.
3. Лагун, А. В. Формирование личного информационного иммунитета в условиях постоянного информационного воздействия / А. В. Лагун, Н. Н. Строев // Ученые записки Санкт-Петербургского имени В. Б. Bobкова филиала Российской таможенной академии. – 2018. – Т. 3 (67). – С. 108–110.
4. Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия». – 1992.
5. Плешаков, В. А. Теория криминологической безопасности как частная теория криминологии / В. А. Плешаков // Человек: преступление и наказание. – 2011. – № 2.
6. Ажмухамедов, И. М. Методика комплексной оценки уровня безопасности Прикаспийских регионов / И. М. Ажмухамедов, А. В. Федотова, В. А. Корякова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 1. – С. 97–111.
7. Harrington, E. C. The desirable function / E. C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965. – Vol. 21, № 10. – P. 494–498.
8. Simple winforms control to create and edit directional graphs / GitHub. – URL: <https://github.com/Logical-Error/Graph> (дата обращения: 01.05.2023).

References

1. Roshchupkina, A. A., Sidorina, T. V. Sistema regionalnykh pokazateley ekonomicheskoy bezopasnosti [System of Regional Indicators of Economic Security]. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science], 2019, no. 3.
2. Saraykin, Yu. V. Pokazateli i kriterii otsenki sotsialnoy bezopasnosti regiona Statisticheskiy aspekt [Indicators and criteria for assessing the social security of the region. Statistical aspect]. *Vestnik Volzhskogo universiteta imeni V. N. Tatishcheva* [Bulletin of the Volga University named after V. N. Tatishchev], 2010, no. 19, p. 63–65.
3. Lagun, A.V., Stroeve, N. N. Formirovaniye lichnogo informatsionnogo immuniteta v usloviyakh postoyan-nogo informatsionnogo vozdeystviya [Formation of personal informational immunity in conditions of constant infor-mational impact]. *Uchenyye zapiski Sankt-Peterburgskogo imeni V. B. Bobkova filiala Rossiyskoy tamozhennoy akad-emii* [Proceedings of St. Petersburg named after V. B. Bobkov branch of the Russian Customs Academy], 2018, vol. 3 (67), pp. 108–110.
4. Metodika «Kriterii otsenki ekologicheskoy obstanovki territoriy dlya vyyavleniya zon chrezvychaynoy ekologicheskoy situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya» [Methodology «Criteria for assessing the ecological situation of territories to identify zones of ecological emergency and zones of ecological disaster»], 1992.
5. Pleshakov, V. A. Teoriya kriminologicheskoy bezopasnosti kak chastnaya teoriya kriminologii [Theory of criminological security as a private theory of criminology]. *Chelovek: prestupleniye i nakazaniye* [Man: crime and punishment], 2011, no. 2.
6. Azhmukhamedov, I. M., Fedotova, A. V., Koryakova, V. A. Metodika kompleksnoy otsenki urovnya be-zopasnosti Prikaspiyskikh regionov [Methodology for a comprehensive assessment of the level of security of the Cas-pian regions]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technol-ogies], 2023, no. 1, pp. 97–111.
7. Harrington, E. C. The desirable function. *Industrial Quality Control*, 1965, vol. 21, no. 10, pp. 494–498.
8. Simple winforms control to create and edit directional graphs. GitHub. Available at: <https://github.com/LogicalError/Graph> (accessed 01.05.2023).

Статья поступила в редакцию 20.05.2023; одобрена после рецензирования 12.06.2023; принята к публи-кации 14.06.2023.

The article was submitted 20.05.2023; approved after reviewing 12.06.2023; accepted for publication 14.06.2023.

DOI 10.54398/20741707_2023_3_98

УДК 004.9

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОГНИТИВНЫХ ТРЕНИРОВОК

Литвиненко Владимир Алексеевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28,

бакалавр, ORCID: 0000-0003-1717-603X, e-mail: vladimirlit00.00@mail.ru

Степанов Станислав Владиславович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28,

студент, ORCID: 0000-0002-6746-8754

Черкашин Дмитрий Романович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28, Государственное бюджетное учреждение «Волгоградский медицинский научный центр», 400131, Российская Федерация, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1,

бакалавр, ORCID: 0000-0001-7421-3517

Донская Анастасия Романовна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28,

аспирант, ORCID: 0000-0003-3086-4929

Данная работа направлена на исследование и улучшение процесса выявления и тренировки когнитивного дефицита – чрезвычайно трудозатратного для медицинского персонала процесса, отрицательно сказывающегося на моральном состоянии больных. Цель работы – положительное влияние на динамику проведения и восприятия процесса выявления и тренировки когнитивного дефицита за счёт реализации такого процесса в виде игрофицированного и автоматизированного программного комплекса тренировки когнитивного дефицита. В работе представлен анализ способа реализации поставленной цели и приведён пример разработки такой реализации в виде одного из модулей создаваемого программного комплекса когнитивных тренировок, автономно проводящего тестирование с диагностированием, а также тренировку когнитивного дефицита с покрытием всех областей когнитивных функций человека. Предлагаемое решение обеспечит положительное влияние на динамику проведения и восприятия процесса выявления и тренировки когнитивного дефицита и может быть использовано в любой сфере, связанной с проблемой когнитивного дефицита.

Ключевые слова: когнитив, когнитивный дефицит, виртуальная реальность, игрофикация, компьютеризация, тестирование, тренировка, медицина, программное обеспечение, автоматизация

COGNITIVE TRAINING SOFTWARE PACKAGE

Litvinenko Vladimir A., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0000-0003-1717-603X, e-mail: vladimirlit00.00@mail.ru

Stepanov Stanislav V., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

student, ORCID: 0000-0002-6746-8754

Cherkashin Dmitriy R., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

bachelor, ORCID: 0000-0001-7421-3517

Donskaya Anastasiya R., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0003-3086-4929

The article is devoted to a research and an improvement of the process of identifying and training of cognitive deficits – an extremely labor-intensive process for medical personnel that negatively affects the morale of patients. The purpose of the work is a positive impact on the dynamics of the implementation and perception of the process of identifying and training cognitive deficits through the implementation of such a process in the form of a gamified and automated cognitive deficits training software package. The paper presents an analysis of the method for achieving of the set goal and provides an example of developing such a method in the form of one of the modules of the cognitive training software package being created, which autonomously conducts testing with diagnosis, as well as training for cognitive deficits covering all areas of human cognitive functions. The proposed solution will provide a positive impact on the dynamics of the conduct and perception of the process of identifying and training cognitive deficits and can be used in any area related to the problem of cognitive deficits.

Keywords: cognitive, cognitive deficit, virtual reality, gamification, cybernation, testing, training, medicine, software, automation

ВВЕДЕНИЕ

Возникновение проблем с когнитивными функциями, прозванных когнитивным дефицитом (далее К.Д.), является широко распространенной тяжелой болезнью, чей охват человечества с каждым годом растёт всё больше и стремительнее [1]. Процесс же лечения К.Д., казалось бы, выстроенный и апробированный, содержит большое количество тяжёлых и значительно усложняющих его моментов и, что самое важное, имеет наилучший положительный эффект только при наиболее раннем своём начинании относительно временной точки выявления болезни у человека. При этом как сам процесс лечения, так и процесс выявления К.Д. являются чрезвычайно затратными по человеческим ресурсам и требуют к себе много внимания, которое могло бы быть уделено более ответственным медицинским задачам. Помимо того, данные процессы зачастую отрицательно сказываются на моральном состоянии людей с К.Д., что способно приводить к ухудшению их состояния и дополнительному усложнению их лечения. Положительно повлиять на подобную ситуацию способен, по крайней мере, частично автоматизированный комплекс по независимому выявлению и тренировке (лечению) К.Д., представленный в виде компьютеризированного процесса современного метода лечения К.Д., который помимо приёма на себя этого груза дополнительно сможет улучшить моральное состояние больных за счёт усиления их вовлечённости посредством использования, например, игрофикации.

Таким образом, целью данной работы является положительное влияние на динамику проведения и восприятия процесса выявления и тренировки К.Д. за счёт реализации такого процесса в виде игрофицированного и автоматизированного программного комплекса тренировки К.Д. В качестве среды для реализации такого комплекса выступает виртуальная реальность.

АНАЛИЗ ОБЪЕКТНОЙ ОБЛАСТИ

Рассмотрим примеры компьютеризации (то есть представления чего-либо в качестве программной реализации) в данной области и существующие недостатки. Самый важный из аспектов компьютеризации – возможность автоматизации, что можно видеть на примере статьи [2], в которой компьютеризация рассматривается в качестве способа реализации автономной системы отслеживания активности людей с К.Д. в форме мобильного приложения для решения ряда проблем, включая: суточное отслеживание и диагностирование пациента, что невозможно в нормальных условиях при посещении кабинета врача, и решение проблемы неприятия пациентами процесса выявления и лечения К.Д., часто вызывающего отрицательные эмоции (например смущение) при прохождении при стороннем наблюдателе.

В дополнение к потенциальному решению описанных ранее проблем компьютеризация также способна предложить положительное увеличение динамики в процессе выявления и лечения К.Д., что доказывается в статье [3], где на основе сравнения результатов двух групп, одна из которых проходила компьютеризированные тренировки по проблеме К.Д., а вторая – нет, проводится анализ и делается вывод в пользу положительного влияния подобного подхода.

Теперь рассмотрим примеры применения игрофикации (то есть игрофицирования чего-либо с целью повышения интереса) в данной области. В первую очередь обратимся к проблеме вовлечённости людей с К.Д. в процесс его выявления. В статье [4] авторы, проводя исследование возможности использования обычных и привычных типичному человеку компьютерных игр (например пасьянс «Клондайк») в качестве инструментов выявления К.Д., доказали, что игры, являясь объектами, требующими задействования различных когнитивных функций человека, будучи способными быть используемыми в качестве таковых инструментов, вовлекают человека в непосредственный процесс игрофицированного выявления К.Д. и, соответственно, повышают его заинтересованность.

В дополнение к этому в статье [5] приводится рассмотрение игрофикации в качестве инструмента с функцией вовлечения – авторы в виде игры для мобильных телефонов реализовали инструмент для анализа К.Д., пользовавшийся повышенным спросом у испытуемых по сравнению с более классическими аналогами.

Далее рассмотрим примеры влияния виртуальной реальности (то есть средства для создания и передачи человеку через органы восприятия искусственного созданной среды, далее VR) на данную область. В первую очередь VR – отличный инструмент для усиления ощущений реальности, а следовательно, и необходимости реакции человека на происходящее, в данном случае во время прохождения процесса выявления К.Д. Так, в статьях [6, 7] анализируется способность VR влиять на когнитивные функции человека (в том числе VR игр). Анализ показал, что VR оказывает позитивное влияние на когнитивное состояние человека.

Не стоит забывать, однако, что VR также способен вызывать и негативные эффекты, например «морскую болезнь». Изучение данной проблемы приводится в статье [8], где авторы приводят результаты по принятию VR, представленного в виде когнитивной тренировки. Для испытаний была сформирована целевая группа испытуемых, постоянно проходивших данную тренировку параллельно с измерением дезориентации. Итогом исследования стало заключение, что наибольшая часть

испытуемых положительно восприняли VR, а следовательно, он может быть использован для решения массовых проблем вроде выявления К.Д.

В дополнение к теме принятия авторы статьи [9] провели эксперимент по выявлению причин возникновения симптомов дезориентации при использовании VR. Выяснилось, что такие симптомы выражаются лишь у неосведомленных об окружении пользователей VR, что решается выделением специальной зоны для использования VR.

Таким образом, цель данной работы – программный комплекс, который может быть реализован в виде игрофицированных компьютеризированных методов выявления К.Д. в виртуальном пространстве. В такой конфигурации он будет решать как проблему морального состояния пациента, так и проблему автоматизации проведения процесса выявления К.Д.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Для выполнения поставленной цели, в первую очередь, необходимо провести системный анализ процесса выявления и лечения К.Д. и внедрить в него предлагаемое решение. Данный анализ представлен в виде концептуальной карты на рисунке 1.

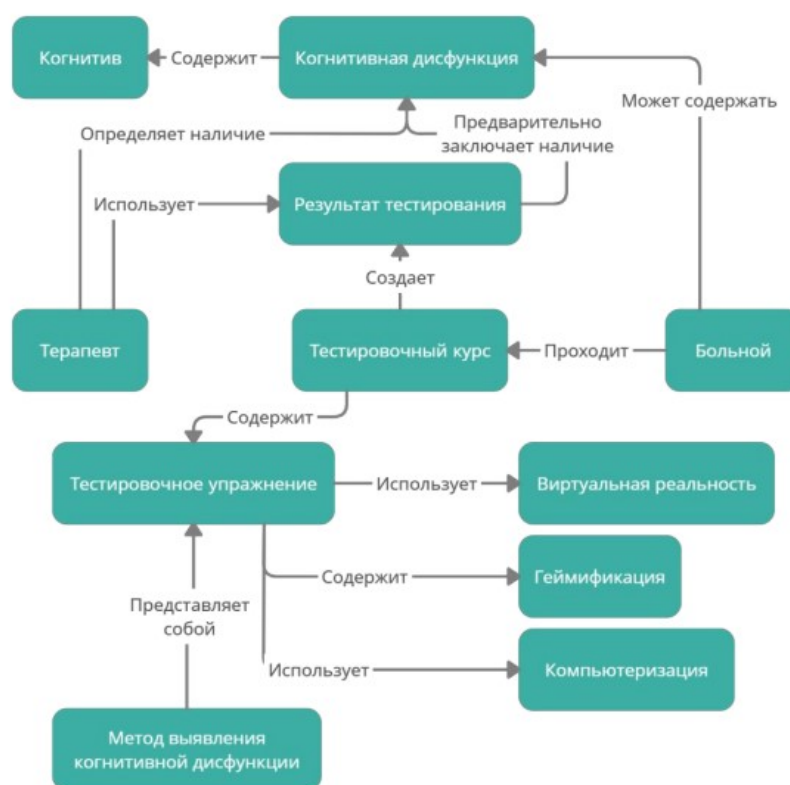


Рисунок 1 – Концептуальная карта системного анализа предлагаемого решения

Основой выделения методов выявления и тренировки К.Д. для последующей их компьютеризации является шкала для оценки психического статуса человека (Mini-Mental State Examination, MMSE) [10]. Так, для каждой из основных когнитивных функций, а именно: памяти, письма, чтения, рисования, ориентации во времени, восприятия и ориентации в пространстве, будет выделен собственный метод выявления и тренировки когнитивного нарушения, представляющий собой отдельное уникальное игрофицированное упражнение в виртуальном пространстве, основанное на соответствующих тестовых аналогах такого из шкалы MMSE. Описанные упражнения будут проходиться последовательно, одно за другим, после чего будет выводиться анализ достигнутого человеком во время прохождения и соответствующие метрики, а также делаться предварительный вывод о наличии К.Д. Игрофикация же каждого из упомянутых упражнений будет проводиться путём внедрения игровых механик, требующих человеческого взаимодействия, которые заменят собой тестовые вопросы и при этом будут направлены на соответствующие когнитивные функции человека.

Рассмотрим вариацию реализации описанных моделей и методов на практике на примере программного модуля тренировки пространственного когнитивного мышления – когнитивной способности, связанной с ориентацией в пространстве. Она охватывает способность воспринимать, понимать и манипулировать информацией, связанной с пространственными объектами и их отношениями в пространстве.

Реализуемый VR-комплекс для когнитивных тренировок включает модуль тренировки пространственного когнитивного мышления и представляет собой компьютерную программу, которая использует виртуальную реальность для создания тренировочной среды, в которой пользователи могут улучшать свои навыки ориентации в пространстве и другие аспекты пространственного когнитивного мышления. Модуль включает в себя задачу, связанную с ориентацией в трёхмерном пространстве и различением форм и размеров геометрических фигур.

Сама задача, решаемая в рамках модуля тренировки, представляет из себя следующий сценарий: пациент попадает в виртуальное трёхмерное пространство, которое наполнено фигурами разной геометрической формы. Целью пользователя является поиск на мини-карте своего местоположения ориентируясь исключительно через окружение.

На данный момент методика тестирования в рамках программного продукта разрабатывается совместно со специалистами предметной области (психологами, неврологами и нейрохирургами), поэтому далее будет описание метода только в срезе тренировки когнитивных способностей.

В рамках персонализированного подхода комплекс предлагает три уровня сложности: лёгкий, средний и сложный, что позволяет упростить настройку сессии и понизить уровень вхождения для пожилых людей. При лёгком уровне сложности генерируется обстановка, представленная на рисунке 2, которая состоит из 10 цветных объектов и фона, имеющего нарисованный горизонт.

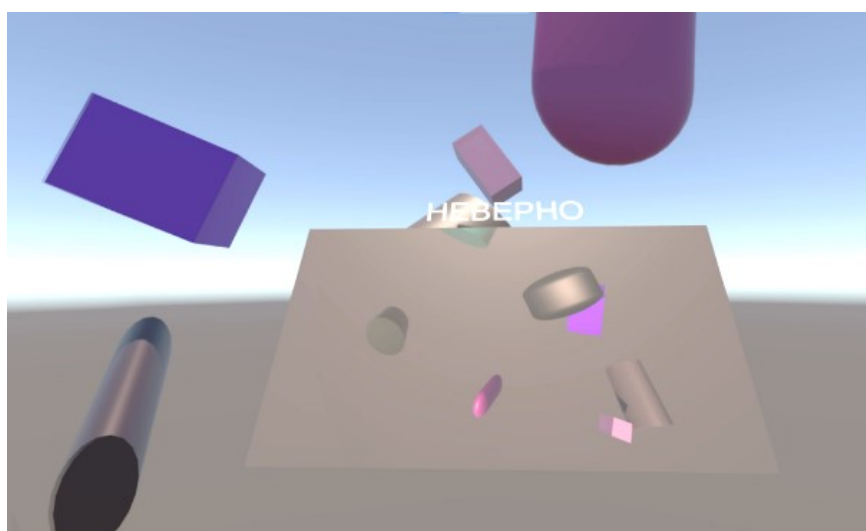


Рисунок 2 – Обстановка лёгкого уровня сложности модуля тренировки когнитивного мышления

На среднем уровне сложности генерируется обстановка, представленная на рисунке 3. Она имеет меньшее, по сравнению с обстановкой из лёгкого уровня сложности, количество различных объектов и монотонное окружением без чёткого ориентира (горизонта).

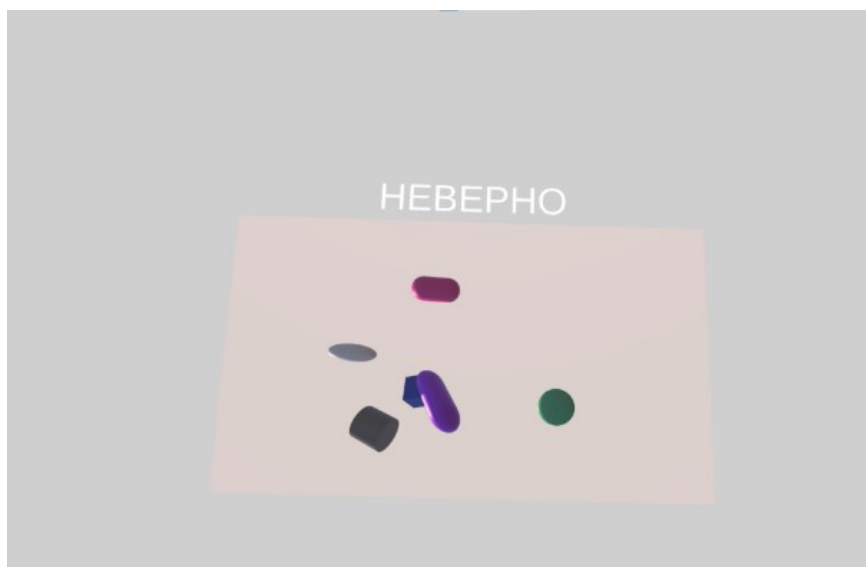


Рисунок 3 – Обстановка среднего уровня сложности модуля тренировки когнитивного мышления

На высоком уровне сложности обстановка имеет вид, представленный на рисунке 4, и состоит из наименьшего количества фигур одного цвета без каких-либо дополнительных ориентиров.

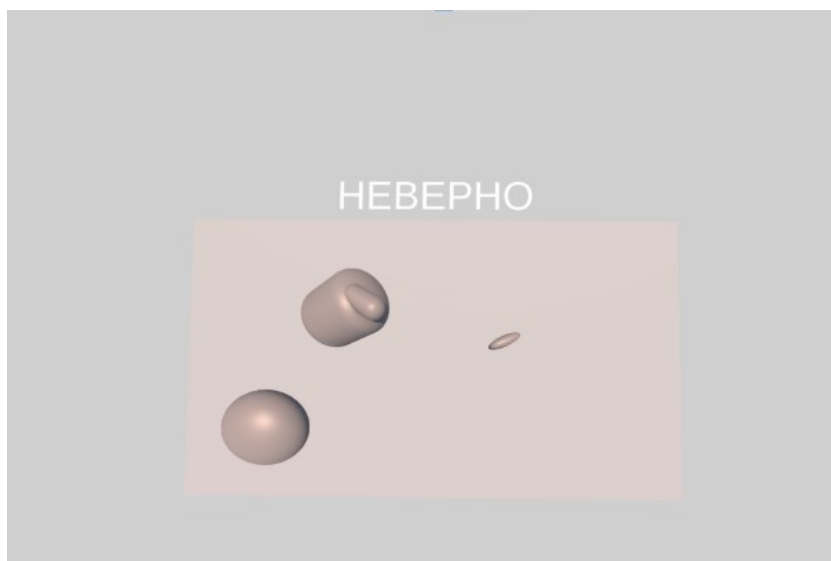


Рисунок 4 – Обстановка высокого уровня сложности модуля тренировки когнитивного мышления

Алгоритм генерации обстановки представлен на рисунке 5.

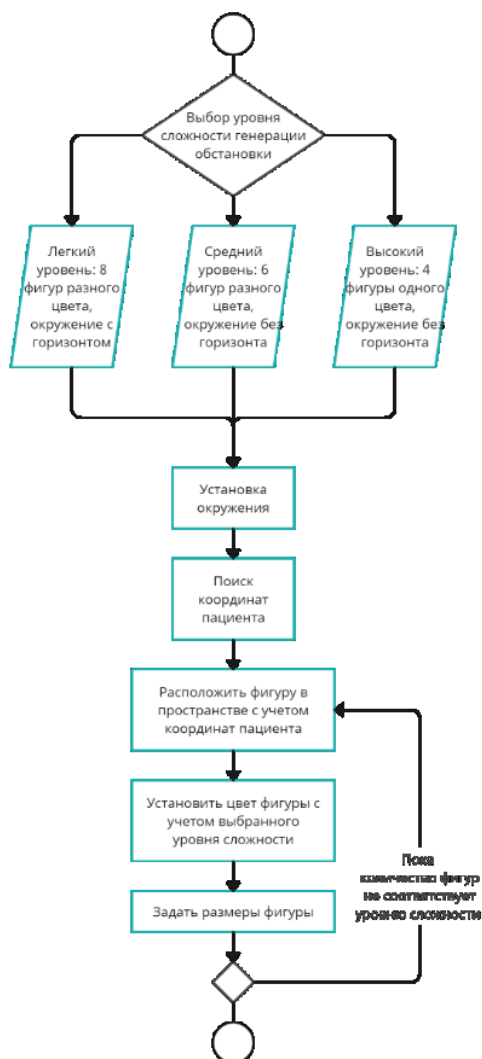


Рисунок 5 – Алгоритм генерации обстановки

После выбора сложности и генерации соответствующей обстановки пациенту предстоит работа с созданной обстановкой – пациенту необходимо определить своё местоположение в виртуальном пространстве. Для взаимодействия с виртуальным пространством используются VR-контроллеры: отклонения стика на правом контроллере отвечает за перемещение проекции окружения, а отклонения стика на левом – за масштабирование и поворот. Данный процесс включает в себя сложную координацию рук и глаз, а также требует высокой концентрации и повышенного внимания со стороны пациента.

Когда пациент находит положение проекции, в котором он может узнать окружающее пространство, ему необходимо предпринять попытку найти себя на этой проекции. Чтобы отметить какое-либо место на проекции, необходимо указательным пальцем виртуальной руки (контроллера) указать точку на проекции. Если указание области будет неверным, то модуль зарегистрирует эту попытку как неудачную и будет ожидать дальнейшего ввода, пока не будет достигнуто успешное выполнение задания. После успешного ввода, программа информирует пациента об этом и выводит подсчёт результатов. В статистику входят следующие данные: время прохождения в секундах и количество неудачных нажатий.

Для реализации прототипа модуля был использован игровой движок Unity3D и язык программирования C#. Для передачи виртуальной среды пользователю используются шлем и контроллеры виртуальной реальности.

АПРОБАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ

В качестве площадки для тестирования и апробации программного комплекса выявления и тренировки К.Д. станет одна из клиник психосоматики Волгоградской области. Для оценки достижения цели исследования предлагается провести два различных тестирования. Первое будет проводиться на двух тестовых группах людей, одна из которых обладает К.Д. путём сравнения полученных ими результатов в системе. Реализация данного тестирования планируется на базе клиники психосоматики в Волгоградской области. Второе тестирование будет проводиться на студентах путём сравнения полученных ими метрик в системе с заданными врачами из соответствующей клиники психосоматики метриками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Текущая версия реализации программного комплекса когнитивных тренировок уже может быть использована и полезна для тестирования и тренировки К.Д. у людей разных возрастных групп и профессиональных сфер.

В дальнейшем планируется на базе созданной версии программного комплекса реализовать процесс работы, представленный на рисунке 6. Данный процесс является процессом полного тестирования и тренировки К.Д. у человека, который выглядит следующим образом:

- пациент последовательно проходит тренировки всех модулей программного комплекса, покрывая таким образом весь спектр областей К.Д.;
- на основе полученных пациентом результатов выполнения тренировок проводится анализ на наличие К.Д.;
- в зависимости от результатов анализа производится диагностирование пациента о наличии или об отсутствии К.Д., которое передаётся соответствующему медперсоналу.

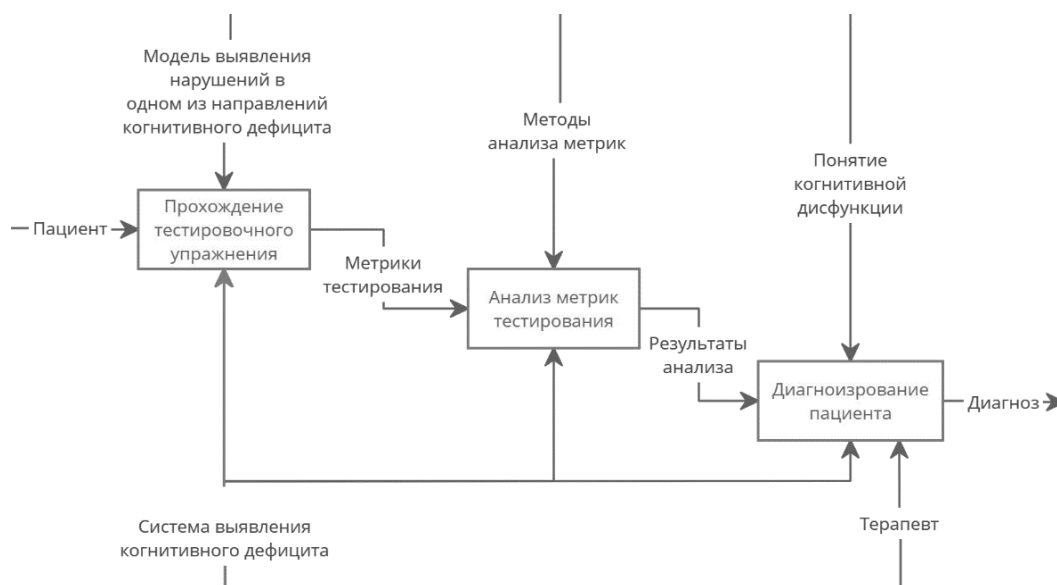


Рисунок 6 – Принцип работы программного комплекса в виде idef0 диаграммы

Стоит отметить, что текущая версия прототипа покрывает лишь часть областей К.Д. и в дальнейшем планируется их расширения, включая следующие модули:

- модуль внимания и концентрация;
- модуль памяти;
- модуль координации;
- модуль логического мышления.

Конечным результатом данной работы станет автономный программный комплекс игрофицированного процесса тренировки К.Д. в виртуальной реальности, способный самостоятельно проводить сеанс процесса выявления и лечения К.Д. у человека. Такой комплекс окажет положительное влияние на динамику проведения и восприятия процесса выявления и лечения К.Д.

Список источников

1. Fleming, R. World Alzheimer Report 2020: Design Dignity Dementia: dementia-related design and the built environment, Alzheimer's Disease International / R. Fleming, J. Zeisel and K. Bennett. – 2020.
2. Kosucu, B. Opportunistic sensing and detection of mild cognitive impairment / B. Kosucu, N. Hernández, T. Olugbade // PETRA '14 : Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. – 2014. – № 67. – doi: 10.1145/2674396.2674424.
3. Stavros, Z. Computer based cognitive training for patients with mild cognitive impairment (MCI) / Z. Stavros, K. Fotini, T. Magda // PETRA '10 : Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. – 2010. – № 21. – doi: 10.1145/1839294.1839319.
4. Gielis, K. Can Card Games Be Used to Assess Mild Cognitive Impairment?: A Study of Klondike Solitaire and Cognitive Functions / K. Gielis, F. Brito, J. Tournoy, V. V. Abeele // CHI PLAY '17 Extended Abstracts : Extended Abstracts Publication of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play. – 2017. – doi: 10.1145/3130859.3131328.
5. Votis, K. Mobile Cognitive Training Games for older adults with mild cognitive impairment / K. Votis, D. Giakoumis, M. Vasileiadis, S. Doumpoulakis, S. Segkoyli, D. Tzovaras // MobileHCI '15 : Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct. – 2015. – doi: 10.1145/2786567.2794307.
6. Yan, M. Effects of virtual reality combined cognitive and physical interventions on cognitive function in older adults with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis / M. Yan, Y. Zhao, Q. Meng, S. Wang, Y. Ding, Q. Liu, H. Yin, L. Chen // Ageing Research Reviews. – 2022. – № 81. – DOI: 10.1016/j.arr.2022.101708.
7. Manera, V. A Feasibility Study with Image-Based Rendered Virtual Reality in Patients with Mild Cognitive Impairment and Dementia / V. Manera, E. Chapoulie, J. Bourgeois, R. Guerchouche, R. David // PLOS ONE. – 2016. – № 11 (3). – doi: 10.1371/journal.pone.0151487.
8. Qiu, R. Virtual reality-based targeted cognitive training program for Chinese older adults: A feasibility study / R. Qiu, Y. Gu, C. Xie, Y. Wang, Y. Sheng, J. Zhu, Y. Yue, J. Cao // Geriatric Nursing. – 2022. – № 47. – doi: 10.1016/j.gerinurse.2022.06.007.
9. Menin, A. The effects of VR in training simulators: Exploring perception and knowledge gain / A. Menin, R. Torchelsen, L. Nedel // Computers & Graphics. – 2022. – № 102. – DOI: 10.1016/j.cag.2021.09.015.
10. Folstein, M. F. "Mini-mental state": A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician / M. F. Folstein, S. E. Folstein, P. R. McHugh // Journal of Psychiatric Research. – 1975. – № 12. – doi: 10.1016/0022-3956(75)90026-6.

References

1. Fleming, R., Zeisel, J. and Bennett, K. *World Alzheimer Report 2020: Design Dignity Dementia: dementia-related design and the built environment*, Alzheimer's Disease International, 2020.
2. Kosucu, B., Hernández, N. and Olugbade, T. Opportunistic sensing and detection of mild cognitive impairment. *PETRA '14: Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 2014, no. 67. doi: 10.1145/2674396.2674424.
3. Stavros, Z., Fotini, K. and Magda, T. Computer based cognitive training for patients with mild cognitive impairment (MCI). *PETRA '10: Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 2010, no. 21. doi: 10.1145/1839294.1839319.
4. Gielis, K., Brito, F., Tournoy, J. and Abeele, V. V. Can Card Games Be Used to Assess Mild Cognitive Impairment?: A Study of Klondike Solitaire and Cognitive Functions. *CHI PLAY '17 Extended Abstracts: Extended Abstracts Publication of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 2017. doi: 10.1145/3130859.3131328.
5. Votis, K., Giakoumis, D., Vasileiadis, M., Doumpoulakis, S., Segkoyli, S. and Tzovaras, D. Mobile Cognitive Training Games for older adults with mild cognitive impairment. *MobileHCI '15: Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct*, 2015. doi: 10.1145/2786567.2794307.
6. Yan, M., Zhao, Y., Meng, Q., Wang, S., Ding, Y., Liu, Q., Yin, H. and Chen, L. Effects of virtual reality combined cognitive and physical interventions on cognitive function in older adults with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, 2022, no. 81. doi: 10.1016/j.arr.2022.101708.

7. Manera, V., Chapoulie, E., Bourgeois, J., Guerchouche, R. and David, R. A Feasibility Study with Image-Based Rendered Virtual Reality in Patients with Mild Cognitive Impairment and Dementia. *PLOS ONE*, 2016, no. 11 (3). doi: 10.1371/journal.pone.0151487.
8. Qiu, R., Gu, Y., Xie, C., Wang, Y., Sheng, Y., Zhu, J., Yue, Y. and Cao, J. Virtual reality-based targeted cognitive training program for Chinese older adults: A feasibility study. *Geriatric Nursing*, 2022, no. 47. doi: 10.1016/j.gerinurse.2022.06.007.
9. Menin, A., Torchelsen, R. and Nedel, L. The effects of VR in training simulators: Exploring perception and knowledge gain. *Computers & Graphics*, 2022, no. 102. doi: 10.1016/j.cag.2021.09.015.
10. Folstein, M. F., Folstein, S. E. and McHugh, P. R. "Mini-mental state": A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 1973, no. 12. doi: 10.1016/0022-3956(75)90026-6.

Статья поступила в редакцию 22.04.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023; принята к публикации 04.05.2023.

The article was submitted 22.04.2023; approved after reviewing 02.05.2023; accepted for publication 04.05.2023.

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 004.056

СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД СОКРЫТИЯ ИНФОРМАЦИИ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЗИРОВАННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Аникин Игорь Вячеславович, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-9478-4894, e-mail: IVAnikin@kai.ru
Исмаилов Ильяс Идрисович, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Российская Федерация, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-0446-8204, e-mail: iiismag@mail.ru

В обеспечении информационной безопасности важная роль отводится стенографическим методам и средствам защиты информации. В системах защиты информации на основе стеганографических методов большой интерес представляет задача повышения криптостойкости стеганоключей. В статье предложен стеганографический метод с преобразованием, использующий контейнер в виде цифрового изображения. В основе метода лежит преобразование блоков изображения, в которые встраиваются биты скрываемого сообщения, с использованием синтезированных параметризованных дискретных ортогональных преобразований Уолша. В матричной форме представлен способ построения матриц этих дискретных преобразований на основе формирующих ядер в виде действительно-значного обобщенного спектрального ядра порядка 2. Стеганографическая система, реализующая предложенный метод, относится к системам с секретным ключом. Составной секретный ключ состоит из псевдослучайного числа для задания размерности параметрического дискретного ортогонального преобразования Уолша для побочной обработки изображения; псевдослучайной последовательности для задания вектора углов вращения из заранее сформированной дискретной сетки значений при формировании матрицы преобразования; псевдослучайной последовательности, элементы которой будут определять блоки изображения для сокрытия информации; вектора номеров трансформант блока изображения для внедрения битов сообщения. Программная реализация предложенного метода выполнена в среде Matlab R2021b. Программа решает задачи внедрения сообщений в цифровые изображения формата bmp и их извлечения на стороне абонента-адресата. Исследованы отдельные атаки на стегоконтейнер. Показано, что возможно семантически успешно восстанавливать определенные сообщения при искажении стегоконтейнера импульсной атакой с плотности шума до 0,1. Приведены оценки криптостойкости стеганоключа. Показано, что количество возможных вариантов ключей невозможно перебрать за приемлемое время.

Ключевые слова: защита информации, стеганография, стегоконтейнер, стегоключ, цифровое изображение, дискретное ортогональное преобразование, дискретное преобразование Уолша, псевдослучайная последовательность, криптостойкость

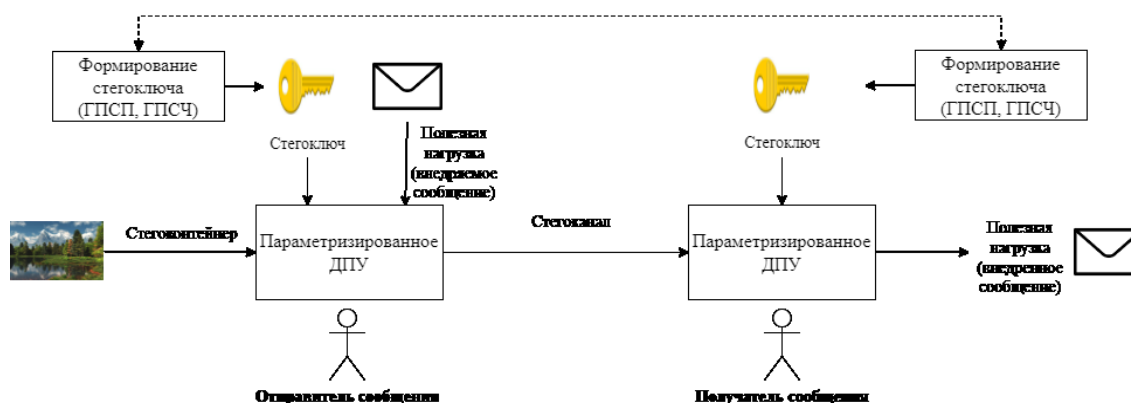
STEGANOGRAPHY METHOD FOR DIGITAL IMAGES BASED ON PARAMETRIC DISCRETE ORTHOGONAL TRANSFORMS

Anikin Igor V., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, 10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-9478-4894, e-mail: IVAnikin@kai.ru
Ismagilov Ilyas I., Kazan (Volga region) Federal University, 18 Kremlevskaya St., Kazan, 420008, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-0446-8204, e-mail: iiismag@mail.ru

Steganography takes an important role in information security. It also important to increase cryptographic strength of steganography keys in these methods. We suggested steganography method for digital images based on synthesized parametric discrete orthogonal Walsh transform. A method is presented for constructing matrices of these discrete transformations based on forming kernels in the form of a real-valued generalized spectral kernel of order 2. The proposed steganographic system belongs to systems with a secret key. The composite secret key consists of a pseudo-random number to set the dimension of the parametric discrete orthogonal Walsh transform for block processing of a digital image; a pseudo-random sequence for specifying a vector of rotation angles from a pre-formed discrete grid of values when forming a parametric discrete orthogonal Walsh transform matrix; a pseudo-random sequence, the elements of which will determine the blocks of a digital image to hide information; a vector of transform numbers of the parametric discrete orthogonal Walsh transform of the digital image block for embedding message bits. We developed software in Matlab R2021b which implements the suggested method. This software can be used to hide and extract binary messages from the bmp digital images (stegocontainers). Some attacks to stegocontainers was investigated. It was showed that we can successfully recover the semantically right signal until noise density 0.1. It was also showed that suggested method is persistent to brute-force attacks.

Keywords: information security, steganography, cover image, key, digital image, discrete orthogonal transform, discrete orthogonal Walsh transform, pseudo-random sequence, crypto-resistance

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стеганография является одним из активных способов защиты конфиденциальности передаваемых сообщений [1]. В отличие от криптографических методов, осуществляющих преобразование открытых сообщений в закрытую форму и требующих для осуществления обратного преобразования наличие секретного ключа, методы стеганографии скрывают сам факт существования сообщения, осуществляя его внедрение в некоторый стеганографический контейнер (изображение, видео- либо аудиофайл, текстовый документ и т. д.), исключая возможность восприятия человеком факта его изменения. Тем самым методы стеганографии организуют скрытый канал передачи информации. Основным преимуществом в данном случае является то, что стеганографические контейнеры не привлекают к себе внимания при передаче по открытому каналу. Зачастую на практике стеганографическое преобразование сообщения производится в дополнение к криптографическому, усиливая тем самым применяемую криптографическую защиту путём скрытия факта передачи шифртекста. Методы стеганографии могут быть использованы также для встраивания цифровых водяных знаков в мультимедийные контейнеры с целью защиты авторских прав [2].

В настоящее время наиболее часто используемыми стегоконтейнерами являются цифровые изображения (ЦИ), что актуализирует разработку для них новых методов встраивания информации [3–5].

БАЗОВЫЕ СВЕДЕНИЯ

Общая схема организации стеганографической системы при использовании цифрового изображения в качестве стегоконтейнера представлена на рисунке.

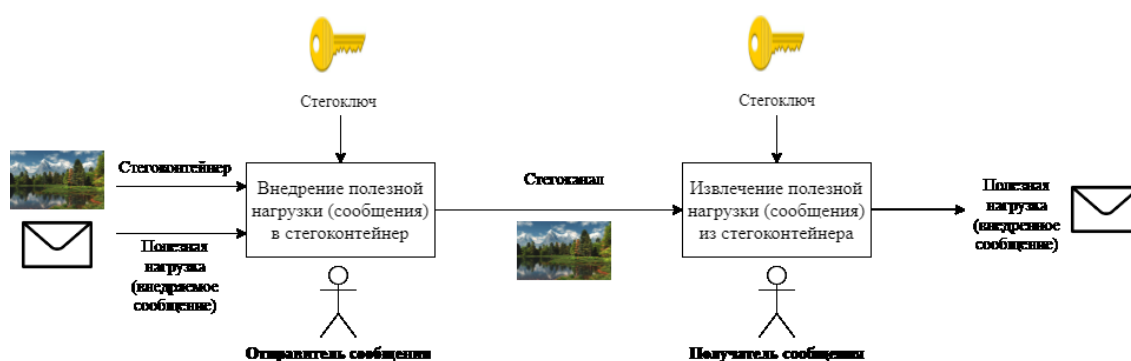


Рисунок 1 – Общая схема организации стеганографической системы

При использовании цифровых изображений в качестве стегоконтейнеров выделяют пространственные (spatial domain) и частотные (transform domain) методы стеганографии [6].

Первая группа методов использует непосредственно пиксели изображения для внедрения внешней полезной нагрузки. К этой группе можно отнести методы, основанные на использовании [6]:

- наименьших значащих бит (LSB);
- разности значений пикселей (PVD);
- EDM-стеганографии (exploiting modification direction);
- MBNS-стеганографии (multi-base notation system);
- сопоставления пар пикселей (PPM);
- изменения уровней серого (GLM);

- значения в средней позиции (MPV);
- предсказания значения пикселя (PVP);
- гистограммы изображения;
- контурных характеристик изображения;
- сопоставления элементов внедряемого сообщения с элементами стегаконтейнера;
- одного из каналов RGB в качестве индикатора встраивания, а остальных – как каналов данных.

Вторая группа методов перед выполнением процесса внедрения сообщения осуществляет преобразование стегаконтейнера в иную форму (как правило, работают с коэффициентами в спектральной области). В качестве таких преобразований в основном используют дискретные ортогональные преобразования (ДОП):

- дискретное косинусное преобразование;
- дискретные вейвлет-преобразования;
- дискретные преобразования Уолша;
- дискретное преобразование Фурье;
- преобразование Карунена – Лоева.

На практике в стеганографии популярны дискретное косинусное преобразование [7], дискретные вейвлет-преобразования [8], дискретные преобразования Уолша [9]. Они имеют алгоритмы быстрых преобразований, поэтому позволяют создавать программные средства решения ряда задач обработки и защиты информации с повышенным быстродействием. Наиболее быстродействующими среди них являются дискретные преобразования Уолша и Хаара. Эти преобразования также могут быть относительно просто реализованы средствами двоичной элементной базы при аппаратной реализации. Отметим, что в последние десятилетия традиционные дискретные преобразования Хаара относят к классу ортогональных вейвлет-преобразований (частному случаю преобразований по вейвлетам Добеши) [10, 11].

Широкое применение при решении ряда задач цифровой обработки сигналов и защиты информации находят цифроориентированные ДОП [11]. Важными свойствами таких ДОП являются наличие быстрых алгоритмов и представимость матриц преобразований в целочисленном виде со значениями элементов из множества небольшой мощности [10, 11]. Среди таких ДОП особенную практическую значимость имеют преобразования в различных упорядочениях дискретных функций Уолша [12]. Дискретные функции Уолша являются двухуровневыми и принимают значения из множества $\{1, -1\}$. Отметим, что настоящее время предложены обобщения систем дискретных функций Уолша, ряд из них представлен в [12–15].

Преобразования в дискретных ортогональных базисах со свойством целочисленности позволяют реализовать процедуру ненормированного преобразования в целочисленной арифметике. В сущности, эта процедура сводится к умножению сигнального вектора на целочисленную ортогональную матрицу, строки которой представляют ненормированные базисные векторы.

Следует отметить, что на современном этапе развития цифровой обработки сигналов нельзя говорить о безоговорочных преимуществах целочисленной арифметики перед вещественной арифметикой, которая оперирует представлением чисел в формате с плавающей запятой [10]. О них можно было говорить раньше, когда в соответствующих процессорах значимо различались времена выполнения элементарных базовых операций сложения и умножения [11]. Сегодня резкий рост производительности процессорных элементов постепенно снижает преимущества целочисленной арифметики, особенно если не рассматривать вопросы аппаратной реализации алгоритмов обработки цифровых сигналов.

В данной работе решается задача разработки стеганографического метода сокрытия данных в цифровых изображениях на основе параметризованных ДОП. При этом в дальнейшем набор скрываемых данных, представленных в виде двоичной последовательности, будем называть бинарным сообщением (далее кратко сообщением). Разработка базового варианта метода проведена с использованием многопараметрического дискретного преобразования Уолша – Адамара (ДПУ). В дальнейшем возможны модификации метода на основе других параметризованных ДОП.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Современное состояние теории ДОП характеризуется наличием ряда подходов к синтезу параметрически перестраиваемых (параметрических) преобразований с быстрыми алгоритмами, которые позволяют изменением параметров приспосабливать оператор преобразования к характеру исходных данных. Возможные структуры таких ДОП рассмотрены в [16, 17]. Следует отметить, что параметризация известных ДОП значительно расширяет множество преобразований, которые можно использовать в стеганографических алгоритмах.

Одним из известных подходов к параметризации быстрых ДОП фиксированной структуры является параметризация элементарных матриц вращений, входящих в факторизованное представление матрицы преобразований. Здесь элементарную матрицу вращений рассматривают в виде действительнозначного обобщенного спектрального ядра вида [16]:

$$V_2 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & -\cos(\alpha) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\alpha \in [0, 2\pi]$.

Обобщенное спектральное ядро представляет матрицу вращения (поворота) в евклидовом пространстве. Параметр α в дальнейшем будем называть углом вращения.

Отметим, что при построении матриц ДОП не следует выбирать α из множества $\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, 2\pi\}$. В этих случаях обобщенное спектральное ядро превращается либо в диагональную, либо в антидиагональную матрицу. По этой причине значения углов вращения целесообразно выбирать из дискретной сетки размерности $(M-4)$

$$\{\Delta\alpha, j = 1, 2, \dots, M-1 \setminus \{\frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\}\}, \quad \Delta\alpha = \frac{2\pi}{M}$$

где M – степень двойки,

При $\alpha = \pi/4$ матрица при соответствующей нормировке сводится к элементарной матрице Адамара порядка 2:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Эта матрица эквивалентна матрице дискретного преобразования Уолша (ДПУ) порядка 2.

Матрица ДПУ порядка $N = 2^n$ может быть построена с использованием формирующего ядра (элементарной матрицы Адамара порядка 2) следующим рекуррентным матричным выражением [10]:

$$HAD_{2^k} = H_2 \otimes HAD_{2^{k-1}}, \quad k = \overline{2, n},$$

где $HAD_2 = H_2$;

$\otimes$ – символ кронекеровского произведения матриц.

Отметим, что строки этой матрицы есть базисные векторы (дискретные функции Уолша). Известны различные упорядочения (порядки расположения) данных функций в дискретной системе Уолша, наиболее популярными из которых при решении практических задач являются [12]:

- секвентивное упорядочение (Уолша – Качмажа);
- диадическое упорядочение (Уолша – Пэли);
- упорядочение в соответствии с расположением строк в матрице Адамара (Уолша – Адамара).

В [18] введено упорядочение дискретных функций Уолша в системе, названное разностным упорядочением. При решении некоторых задач цифровой обработки сигналов использование этой дискретной системы Уолша предпочтительнее упорядочений по Адамару, Пэли и Качмажу [11].

Для наиболее популярных упорядочений дискретной системы Уолша разработаны алгоритмы быстрых преобразований. В качестве базовых алгоритмов можно выделить быстрые алгоритмы ДПУ-Адамара. Перестановкой спектральных коэффициентов (трансформант) Уолша – Адамара могут получены трансформанты в других упорядочениях дискретной системы Уолша.

ДОП, введенное вышеприведенным способом построения матрицы преобразования Уолша – Адамара, при замене элементарной матрицы Адамара порядка 2 на формирующее ядро в виде действительнозначного обобщенного спектрального ядра, назовём параметризованным (параметрическим) ДПУ-Адамара. Приведём матричное соотношение для построения матрицы $PHD_{2^n}(\alpha)$ этого преобразования:

$$PHD_{2^k}(\alpha) = V_2 \otimes PHD_{2^{k-1}}, \quad k = \overline{2, n}, \quad (2)$$

где $PHD_2 = V_2$, а V_2 представлено в виде (1).

Здесь на всех этапах построения матрицы используется одно и то же формирующее ядро (матрица вращения с параметром α). Параметризованное ДПУ-Адамара в этом случае назовём однопараметрическим. Преобразования, при построении матриц которых используется определённая совокупность формирующих ядер с разными значениями параметра α , относятся к многопараметрическим преобразованиям. Для большой информативности в случае использования $k \in [1, 2, \dots, n]$ различных углов вращения построенное преобразование назовём k -параметрическим.

Матрица преобразования $PHD_{2^n}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ в этом случае строится следующим образом:

$$PHD_{2^k}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) = V_2^{(k)} \otimes PHD_{2^{k-1}}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{k-1}), \quad k = \overline{2, n}, \quad (3)$$

где $PHD_2(\alpha_1) = V_2^{(1)}$;

$$V_2^{(k)} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_k) & \sin(\alpha_k) \\ \sin(\alpha_k) & -\cos(\alpha_k) \end{bmatrix}.$$

Отметим, что такой способ синтеза матриц ДОП с учётом непрерывности интервалов задания углов вращений позволяет строить бесконечно большое количество ортонормированных матриц преобразований. При значениях всех углов вращений, равных $\pi/4$, имеем частный случай ДПУ-Адамара.

Кратко остановимся на вопросе вычисления параметрического ДПУ-Адамара размерности $N = 2^n$. Прямой алгоритм преобразования основан на процедуре непосредственного умножения сигнального вектора-столбца на матрицу:

$$F = \text{PHD}_N(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) f,$$

где $f = \{f(i), i = 0, \overline{N-1}\}^T$ – N -мерный сигнальный вектор;

$F = \{F(i), i = 0, \overline{N-1}\}^T$ – N -мерный вектор коэффициентов преобразования (спектральных коэффициентов, трансформант).

Представимость матрицы параметрического ДПУ-Адамара в виде кронекеровского произведения формирующих ядер позволяет синтезировать быстрые алгоритмы преобразования на основе факторизации матрицы преобразования. Способы факторизации кронекеровских матриц достаточно полно рассмотрены в [13, 14, 19].

Рассмотрим вопрос сокрытия данных в цифровых изображениях на основе параметризованных ДПУ. Разработка базового варианта метода проведена с использованием многопараметрических ДПУ-Адамара. Метод предполагает передачу в составе секретного ключа информации о номерах трансформант, которые будут использованы для встраивания битов сообщения. Остальные упорядочения базиса многопараметрического ДПУ в рамках предлагаемого метода не рассматриваются. Это связано с тем, что изменения упорядочения приводят лишь к изменению нумерации выбранных трансформант для встраивания битов сообщения.

Стеганографическая система, реализующая предлагаемый метод, относится к системам с секретным ключом и использует составной секретный ключ (стеганоключ), который должен быть заранее известен абонентам до начала скрытого обмена сообщениями.

ВСТРАИВАНИЕ СООБЩЕНИЯ В ЦИФРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предварительно введём следующие обозначения: M – скрываемое сообщение; I – цифровое изображение (стегоконтейнер); FI – результат преобразования цифрового изображения (внедрения в изображение I сообщения M).

Приведём поэтапное описание предлагаемого стеганографического метода в части внедрения сообщений в стегоконтейнер (цифровое изображение). Описание ориентировано на случай ЦИ формата bmp.

1. Формирование составного секретного ключа из 4 составляющих:

- псевдослучайного числа (ПСЧ_1) для задания размерности параметрического ДПУ для поблочной обработки ЦИ. Производится равновероятный выбор данного числа из множества $\{8, 16, \dots, 2^k\}$, где k – параметр, задаваемый с учётом размерности изображения-контейнера;

- псевдослучайной последовательности (ПСП_1) для задания вектора углов вращения $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ из заранее сформированной дискретной сетки их значений при формировании матрицы параметрического ДПУ порядка $N = 2^n$, определяемого ПСЧ_1;

- псевдослучайной последовательности (ПСП_2), элементы которой будут определять блоки ЦИ, в которые будет сокрыта информация. При значениях очередного элемента, равного 0, блок ЦИ остаётся неизменным, а при значениях 1, 2, 3 соответствующая часть сообщения скрывается в блоке цифрового изображения с применением параметрического ДПУ. При этом данные значения элемента ПСП_2 будут определять каналы RGB блока ЦИ, в которых будет сокрыта информация. При выпадении значения 1 информация будет встраиваться в канал R, при 2 – в канал B, при 3 – в канал G;

- вектора номеров трансформант параметрического ДПУ блока ЦИ для внедрения битов сообщения (формируется с учётом размерности преобразования).

Для генерации псевдослучайных чисел, необходимых для формирования составного секретного ключа, можно использовать генератор псевдослучайных чисел [20].

2. Формирование двоичного вида скрываемого сообщения M .

3. Определение длины в битах скрываемого сообщения M . Проверка ёмкости контейнера I и возможности внедрения в него данного количества бит. Если ёмкость контейнера недостаточна, необходим выбор контейнера большей ёмкости.

4. Внедрение сообщения M в файл-контейнер I с использованием поблочной обработки на основе параметрических ДПУ и формирование передаваемого файла выходного ЦИ FI с встроенным сообщением.

5. Передача абоненту-адресату файла ключа по защищённому каналу (например, зашифровав его с использованием предварительно распределённого мастер-ключа).

6. Передача абоненту-адресату файла стегоконтейнера по открытому каналу.

Рассмотрим этап 4 внедрения сообщения более подробно.

В методе заложена поблочная обработка ЦИ. Блок ЦИ может быть как одномерным, так и двумерным. В случае использования двумерных блоков, размерности по горизонтали и вертикали могут различаться, то есть блоки будут описываться прямоугольными матрицами размерности $2^k \times 2^l$. В этом случае целесообразно также оперировать одномерным параметрическим ДПУ вектора, полученного построчным сканированием двумерного блока ЦИ. Это связано с тем, что двумерное параметрическое ДПУ размерности $2^k \times 2^l$ изоморфно одномерному преобразованию

размерности $N = 2^n$, где $n = k + l$. Однозначное соответствие компонент двумерного и одномерного спектров определяется следующим соотношением:

$$F(i, j) = F'(2^l + j),$$

где $F'(k)$ – k -я компонента вектора, полученного из двумерного блока ЦИ построчным сканированием.

Следует отметить, что в случае двухмерности блоков первая составляющая ключа должна быть двухэлементной (должна задавать размерности блоков по горизонтали и вертикали).

Обработка текущего блока ЦИ (активного блока) проводится следующим образом. Анализируется текущий элемент ПСП_2 составного ключа. Если значение этого элемента равно 0, текущие блоки каналов RGB записываются в выходное ЦИ. Если значение этого элемента равно 1, 2, 3, проводится прямое параметрическое ДПУ размерности $N = 2^n$ вектора, сформированного из пикселей блока соответствующего канала RGB. Блоки остальных двух каналов в неизменном виде записываются в выходное изображение. Преобразование блока выбранного канала осуществляется по следующей схеме:

$$F = \text{PHD}_N(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) f, \quad (4)$$

где $f = \{f_i, i = \overline{0, N-1}\}^T$ – N -мерный преобразуемый вектор;

$F = \{F_i, i = \overline{0, N-1}\}^T$ – N -мерный вектор коэффициентов преобразования (трансформант).

Процедуру прямого параметрического ДПУ целесообразно реализовать с использованием быстрого алгоритма преобразования на основе факторизованного представления матрицы преобразования.

Встраивание битов сообщения в преобразованные блоки ЦИ можно проводить с использованием известных алгоритмов встраивания в трансформанты дискретного косинусного преобразования. Кратко представим один из наиболее распространённых алгоритмов [21]. Он встраивает один бит сообщения в пару среднечастотных трансформант. Встраивание заключается в изменении данных коэффициентов таким образом, чтобы модуль их разности был больше или меньше некоторой фиксированной величины в зависимости от значения встраиваемого бита:

$$\begin{aligned} |F^*(j_1)| - |F^*(j_2)| &> c, \text{ если } b_i = 0, \\ |F^*(j_1)| - |F^*(j_2)| &< -c, \text{ если } b_i = 1, \end{aligned}$$

где $F^*(j_k)$ – выбранная трансформанта с изменённым значением из их пары для внедрения бита сообщения;

b_i – внедряемый бит;

c – заданная пороговая величина.

Относительно простым, но менее стойким к определённым видам атак на стегоконтейнер, является следующий способ встраивания битов в трансформанты параметрического ДПУ. Здесь предварительно трансформанты, в которые будут встраиваться биты сообщения, приводятся к целочисленному виду округлением. Для встраивания используется вектор номеров трансформант для внедрения битов сообщения (четвёртая часть составного ключа). В каждую выбранную трансформанту встраивается один бит в младший разряд. Встраивание бита проводится по следующим правилам, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Правила встраивания

Внедряемый бит	Младший разряд трансформанты	Младший разряд трансформанты после внедрения бита
0	0	0 (без изменения)
0	1	0 (инверсия)
1	0	1 (инверсия)
1	1	1 (без изменения)

После внедрения битов сообщения M формируется модифицированный вектор трансформант, с использованием которого обратным параметрическим ДПУ формируется матрица блока соответствующего канала RGB для записи в выходное ЦИ. Матрица параметрического ДПУ является ортонормированной и симметричной, поэтому алгоритмы прямых и обратных преобразований одинаковы. Результат обратного преобразования блока определяется по формуле:

$$f^* = \text{PHD}_N(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) F^*, \quad (5)$$

где $f^* = \{f_i^*, i = \overline{0, N-1}\}^T$ – N -мерный восстановленный вектор;

$F^* = \{F_i^*, i = \overline{0, N-1}\}^T$ – N -мерный модифицированный вектор трансформант.

Восстановленный вектор блока ЦИ приводится к целочисленному виду округлением его элементов.

Представленная выше обработка активных блоков ЦИ завершается после встраивания битов символа «Конец сообщения». Оставшаяся часть исходного ЦИ записывается в выходное изображение, на основе которого формируется файл стегоконтейнера для передачи абоненту-адресату.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ИЗ СТЕГОКОНТЕЙНЕРА

Решение основных задач на этапе извлечения сообщения достаточно очевидно вытекают из вышеописанной процедуры их встраивания. В связи с этим остановимся кратко лишь на задаче извлечения битов сообщения из активных блоков стегоконтейнера.

Обработка текущего активного блока соответствующего канала ЦИ с встроенными битами проводится следующим образом. Блок подвергается прямому параметрическому ДПУ. Дальнейшая обработка зависит от выбранного алгоритма встраивания битов в трансформанты.

При использовании алгоритма [21] выполняется та же процедура, что и при встраивании одного бита сообщения в пару трансформант, которые определяются с использованием соответствующей информации об их номерах, переданных в составе ключа. Решение о встроенном бите принимается следующим образом:

$$b_i = 0, \text{ если } |F^*(j_1)| > |F^*(j_2)|, \\ b_i = 1, \text{ если } |F^*(j_1)| < |F^*(j_2)|,$$

где $F^*(j_k)$ – трансформанта активного блока ЦИ стегоконтейнера.

При использовании второго способа встраивания бит сообщения их извлечение производится следующим образом. Текущий активный блок стегоконтейнера подвергается прямому параметрическому ДПУ. Трансформанты с встроенными битами приводятся к целочисленному округлению. Далее проводится анализ их чётности/нечётности. Решение принимается по правилу: если трансформанта имеет чётное значение, то встроенный бит равен 0, иначе – 1.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Программная реализация предложенного метода выполнена в среде Matlab R2021b. Созданный программный комплекс решает задачи внедрения сообщений в цифровые изображения формата bmp и их извлечения на стороне абонента-адресата. Проведено исследование при использовании параметрического ДПУ на основе матрицы $PND_N(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, при следующих значениях углов вращений $\alpha_1 = \alpha_3 = \dots = \alpha_n = \pi/4$, а также переменном значении α_2 . Здесь на этапах рекуррентной процедуры построения матрицы преобразования, кроме второго, формирующие ядра сводятся к элементарной матрице Адамара порядка 2. В программе реализован алгоритм встраивания битов сообщения в младшие разряды трансформант параметрического ДПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ АТАК

При визуальном анализе преобразованного контейнера при небольших размерностях встраиваемых сообщений отсутствуют признаки его модификации. Дополнительно преобразованный стегоконтейнер был исследован программным продуктом Stegsolve, позволяющим подробно исследовать каждый из каналов контейнера. Исследование каждого из каналов также не позволило найти признаки преобразования контейнера.

Были исследованы попытки искажения преобразованного контейнера с помощью импульсной помехи. При импульсной атаке на стегоконтейнер с плотностью шума ≥ 0.1 содержание восстановленного сообщения становится трудно воспринимаемым. Для увеличения стойкости контейнера к импульсным помехам была введена избыточность встраивания. Скрываемое сообщение тиражируется 3 раза, а при восстановлении его символы выбирались по мажоритарному правилу. При таком подходе был получен приемлемый результат извлечения внедренного сообщения при импульсной атаке с плотностью шума 0,1.

СТОЙКОСТЬ К ПОЛНОМУ ПЕРЕБОРУ КЛЮЧЕЙ

Ключевая информация в предложенном методе представляет секретный составной ключ. Представим информацию о ключе в таблице 2.

Размерность пространства перебора представлена в общем случае использования n-параметрического ДПУ одномерных блоков ЦИ.

Таблица 2 – Информация о ключе

Номер составной части	Содержание	Размерность пространства перебора
1	Индекс элемента вектора размерностей параметрического ДПУ ($N_{max} = 2^n$)	N_1
2	Массив индексов элементов вектора углов вращения размерности k	$N_2 = k^n$
3	Базовая четырехзначная ПСП длины l	$N_3 = 4^l$
4	Индексы элементов вектора номеров трансформант блока для внедрения бит	N_4

Итоговое пространство перебора ключей включает в себя следующее количество вариантов: $N = N_1 k^n 4^l N_4$. Например, при $N_1 = 2^3$, $k = 2^5$, $n = 8$, $l = 2^8$, $N_4 = 2^3$ имеем следующую оценку переборов:

$N = 2^{32} 2^{40} 2^{51} 2^3 = 2^{558}$. Очевидно, такое количество вариантов ключей невозможно перебрать за приемлемое время.

Отметим, что криптостойкость метода можно повысить за счёт варьирования его параметров. Возможно также использование традиционных методов криптографии. Например, гаммирование двоичного представления передаваемого сообщения ПСП, передаваемой в составе стегоключа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе стеганографический метод с использованием контейнеров-цифровых изображений, основанный на применении параметризованных ДПУ, параллельно с криптографическими методами, может быть успешно использован для скрытия фактов передачи сообщений по открытым каналам передачи данных. Параметризация дискретных ортогональных преобразований позволяет повысить уровень криптостойкости стеганографических алгоритмов на их основе.

Представленные в статье результаты свидетельствуют о целесообразности более углублённых исследований стеганографических методов на основе параметрических ДПУ. Отметим также актуальность исследований в стеганографии по разработке новых методов и алгоритмов на основе других параметризованных ДОП со структурой быстрых алгоритмов.

Список источников

1. Грибунин, В. Г. Цифровая стеганография / В. Г. Грибунин, И. Н. Оков, И. В. Туринцев. – Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 273 с.
2. Грибунин, В. Г. Стеганографические системы. Цифровые водяные знаки / В. Г. Грибунин, В. Е. Костюков, А. П. Мартынов, Д. Б. Николаев, В. Н. Фомченко. – Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. – 210 с.
3. Федосеев, В. А. Цифровые водяные знаки и стеганография / В. А. Федосеев. – Самара : Издательство Самарского университета, 2019. – 144 с.
4. Сирота, А. А. Метод создания цифровых водяных знаков на основе деформации синтезированных изображений с квазипериодической структурой / А. А. Сирота, А. В. Швырева // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2017. – № 23. – С. 174–184.
5. Выборнова, Ю. Д. Новый метод встраивания цифровых знаков в векторные картографические данные / Ю. Д. Выборнова, В. В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 913–919.
6. Hussain, M. Image Steganography in Spatial Domain: A Survey / M. Hussain, A. W. A. Wahab, Y. I. B. Idris, A. T. S. Ho, K. Jung // Signal Processing: Image Communication. – 2018. – Vol. 65. – P. 45–66.
7. Евсютин, О. О. Стеганографическое встраивание дополнительных данных в снимки дистанционного зондирования земли с помощью метода QIM с переменным шагом квантования в частотной области / О. О. Евсютин, А. С. Кокурина, Р. В. Мещеряков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 8. – С. 155–162.
8. Шелухин, О. И. Стеганография. Алгоритмы и программная реализация / О. И. Шелухин, С. Д. Канаев. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2021. – 592 с.
9. Бахрушина, Г. И. Алгоритм цифрового маркирования полутонового изображения, использующий двумерное кодирование по Уолшу / Г. И. Бахрушина, О. В. Коренева // Ученые заметки ТОГУ. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 48–60.
10. Шеремет, И. А. Обработка изображений с помощью целочисленных ортогональных преобразующих матриц / И. А. Шеремет, А. П. Рукин, В. Д. Лебедев // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 4. – С. 45–52.
11. Исмагилов, И. И. Методы построения целочисленных матриц дискретных ортогональных преобразований / И. И. Исмагилов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2022. – № 1 (38). – С. 110–123.
12. Ахмед, Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов : пер. с англ. / Н. Ахмед, К. Р. Рао ; под ред. И. Б. Фоменко. – Москва : Связь, 1980. – 248 с.
13. Дагман, Э. Е. Быстрые дискретные ортогональные преобразования / Э. Е. Дагман, Г. А. Кухарев. – Новосибирск : Наука, 1983. – 232 с.
14. Агаян, С. С. Успехи и проблемы быстрых ортогональных преобразований (для обработки сигналов-изображений) / С. С. Агаян // Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение. – Москва : Наука, 1992. – Вып. 3. – С. 146–215.
15. Исмагилов, И. И. Дискретные преобразования в базисах уолше-подобных функций: Основы теории и применения в цифровой обработке сигналов / И. И. Исмагилов. – Казань : Отечество, 2003. – 130 с.
16. Солодовников, А. И. Синтез ортогональных базисов на основе обобщенного спектрального ядра / А. И. Солодовников, И. И. Канатов, А. М. Спиваковский // Межвузовский сборник. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1976. – Вып. 2. – С. 99–112.
17. Солодовников, А. И. Синтез полных систем ортонормированных функций, имеющих алгоритм быстрого преобразования / А. И. Солодовников // Вопросы теории систем автоматического управления : межвузовский сборник. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – Вып. 4. – С. 94–105.
18. Исмагилов, И. И. Один подход к упорядочению систем дискретных функций Уолша / И. И. Исмагилов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 49, № 1. – С. 65–72.
19. Агаян, С. С. Сложность и параллельные алгоритмы дискретных ортогональных преобразований / С. С. Агаян, Д. В. Геворкян // Кибернетика и вычислительная техника. – 1988. – Вып. 4. – С. 124–169.
20. Anikin, I. Secure data transmission in cyber-physical systems based on the new approach for stream cipher's gamma generation / I. Anikin, K. Alnajjar // Studies in Systems, Decision and Control. – 2021. – Vol. 350. – P. 333–346.
21. Zhao, J. Embedding robust labels into images for copyright protection / J. Zhao, E. Koch // Proceedings of the International Congress on Intellectual Property Rights for Specialized Information, Knowledge and New Technologies (KnowRight'95). – Austria, Vienna, 1995. – P. 242–251.

References

1. Gribunin, V. G., Okov, I. N., Turintsev, I. V. *Tsifrovaya steganografiya* [Digital steganography]. Moscow, SOLON-PRESS, 2009. 273 p.
2. Gribunin, V. G., Kostyukov, V. E., Martynov, A. P., Nikolaev, D. B., Fomchenko, V. N. *Steganograficheskiye sistemy. Tsifrovyye vodyanyye znaki* [Steganography systems. Digital signatures]. Sarov, 2016. 210 p.
3. Fedoseev, V. A. *Tsifrovyye vodyanyye znaki i steganografiya* [Digital signatures and steganography]. Samara, Izdatelstvo Samarskogo universiteta, 2019. 144 p.
4. Sirota, A. A., Shvyreva, A. V. A. Metod sozdaniya tsifrovyykh vodyanykh znakov na osnove deformatsii sintezirovannykh izobrazheniy s kvaziperiodicheskoy strukturoy [Method of creation of digital signatures based on deformation of synthetic images with quasiperiodic structure]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and information technologies], 2017, no. 23, pp. 174–184.
5. Vybornova, Yu. D., Sergeev, V. V. Novyy metod vstraivaniya tsifrovyykh vodyanykh znakov v vektornyye kartograficheskiye dannyye [New method for embedding digital signatures in vector cartographic data]. *Kompyuternaya optika* [Computer Optics], 2017, vol. 41, no. 6, pp. 913–919.
6. Hussain, M., Wahab, A. W. A., Idris, Y. I. B., Ho, A. T. S., Jung, K. Image Steganography in Spatial Domain: A Survey. *Signal Processing: Image Communication*, 2018, vol. 65, pp. 45–66.
7. Evsyutin, O. O., Kokurina, A. S., Meshcheryakov, R. V. Steganograficheskoye vstraivaniye dopolnitelnykh dannyykh v snimki distantsionnogo zondirovaniya zemli s pomoshchyu metoda QIM s peremennym shagom kvantovaniya v chastotnoy oblasti [Steganography embedding of data in the earth remote sensing images with using QIM method and variable quantization step in frequency domain]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], 2019, vol. 330, no. 8, pp. 155–162.
8. Shelukhin, O. I., Kanaev, S. D. *Steganografiya. Algoritmy i programmaya realizatsiya* [Algorithms and implementation]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2021. 592 p.
9. Bakhrushina, G. I., Koreneva, O. V. Algoritm tsifrovogo markirovaniya polutonovogo izobrazheniya, ispolzuyushchiy dvumernoye kodirovaniye po Uolshu [Algorithm of digital marking of grayscale image with using 2D Walsh coding]. *Uchenye zametki Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Pacific National University], 2016, vol. 7, no. 1, pp. 48–60.
10. Sheremet, I. A., Rukin, A. P., Lebedev, V. D. Obrabotka izobrazheniy s pomoshchyu tselochislennykh ortogonalnykh preobrazuyu-hchikh matrits [Obrabotka izobrazheniy s pomoshchyu tselochislennykh ortogonalnykh preobrazuyushchikh matrits]. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], 2014, no. 4, pp. 45–52.
11. Ismagilov, I. I. Metody postroyeniya tselochislennykh matrits diskretnykh ortogonalnykh preobrazovaniy [Methods of construction integer orthogonal transforms]. *Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki* [Problems of computational and applied mathematics], 2022, no. 1 (38), pp. 110–123.
12. Ahmed, N., Rao, K. R. *Ortogonalnyye preobrazovaniya pri obrabotke tsifrovyykh signalov* [Orthogonal transformations in digital signal processing]. Moscow, Svyaz Publ., 1980. 248 p.
13. Dagman, E. E., Kukharev, G. A. *Bystryye diskretnyye ortogonalnyye preobrazovaniya* [Fast discrete orthogonal transforms]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 232 p.
14. Agayan, S. S. Uspekhi i problemy bystrykh ortogonalnykh preobrazovaniy (dlya obrabotki signalov-izobrazheniy) [Successes and problems of fast orthogonal transformations (for image-signal processing)]. *Raspoznavanie, klassifikatsiya, prognoz. Matematicheskie metody i ikh primeneniye* [Recognition, classification and forecasting. Mathematical methods and their application]. Moscow, Nauka Publ., 1992, issue 3, pp. 146–215.
15. Ismagilov, I. I. *Diskretnyye preobrazovaniya v bazisakh uolshe-podobnykh funktsiy: Osnovy teorii i primeneniya v tsifrovoy obrabotke signalov* [Discrete Transforms in Basis of Walsh-Like Functions: Fundamentals of Theory and Applications in Digital Signal Processing]. Kazan, Otechestvo, 2003. 130 p.
16. Solodovnikov, A. I., Kanatov, I. I., Spivakovskiy, A. M. Sintez ortogonalnykh bazisov na osnove obobshchennogo spektralnogo yadra [Synthesis of orthogonal bases based on the generalized spectral kernel]. *Mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity collection]. Leningrad, Leningrad University Publishing House, 1976, issue 2, pp. 99–112.
17. Solodovnikov, A. I. Sintez polnykh sistem ortonormirovannykh funktsiy, imeyushchikh algoritim bystrogo preobrazovaniya [Synthesis of complete systems of orthonormal functions with a fast transformation algorithm]. *Voprosy teorii sistem avtomaticheskogo upravleniya: mezhvuzovskiy sbornik* [Questions of the theory of automatic control systems: interuniversity collection]. Leningrad, Leningrad University Publishing House, 1978, issue 4, pp. 94–105.
18. Ismagilov, I. I. Odin podkhod k uporyadocheniyu sistem diskretnykh funktsiy Uolsha [One approach to ordering systems of discrete Walsh functions]. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika* [Bulletin of Universities. Radioelectronics], 2006, vol. 49, no. 1, pp. 65–72.
19. Agayan, S. S., Gevorkyan, D. V. Slozhnost i parallelnyye algoritmy diskretnykh ortogonalnykh preobrazovaniy [Complexity and parallel algorithms for discrete orthogonal transformations]. *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika* [Cybernetics and computer systems], 1988, issue 4, pp. 124–169.
20. Anikin, I., Alnajjar, K. Secure data transmission in cyber-physical systems based on the new approach for stream cipher's gamma generation. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, vol. 350, pp. 333–346.
21. Zhao, J., Koch, E. Embedding robust labels into images for copyright protection. *Proceedings of the International Congress on Intellectual Property Rights for Specialized Information, Knowledge and New Technologies (Know-Right'95)*. Austria, Vienna, 1995, pp. 242–251.

Статья поступила в редакцию 25.04.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023; принята к публикации 02.05.2023.

The article was submitted 25.04.2023; approved after reviewing 02.05.2023; accepted for publication 02.05.2023.

УДК 004.896

**МЕТОД ДОВЕРЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ
В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЁННОГО РЕЕСТРА**

Петренко Вячеслав Иванович, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой, ORCID: 0000-0003-4293-7013, e-mail: vipetrenko@ncfu.ru

Тебueva Фарица Биляловна, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, ORCID: 0000-0002-7373-4692, e-mail: ftebueva@ncfu.ru

Стручков Игорь Владиславович, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-8744-498X, e-mail: selentar@bk.ru

Павлов Андрей Сергеевич, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
старший преподаватель, ORCID: 0000-0002-8413-8706, e-mail: anspavlov@ncfu.ru

Рябцев Сергей Сергеевич, Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1,
старший преподаватель, ORCID: 0000-0002-1428-6711, e-mail: nalfartorn@yandex.ru

Высокий темп роста интеграции вычислений с физическими процессами определяет популярность киберфизических систем и актуализирует вопросы обеспечения их информационной безопасности при реализации доверенного взаимодействия. В большинстве работ по взаимодействию агентов в киберфизической системе предлагаемые методы апробируются в лабораторных условиях и не учитывают наличие неблагоприятной внешней среды. При этом, наряду с традиционными угрозами информационной безопасности, киберфизические системы подвержены угрозам реализации специфических атак за счёт системных свойств. Целью работы является повышение эффективности выполнения функциональных задач агентами в децентрализованной киберфизической системе путём обеспечения доверенного взаимодействия между ними на основе технологии распределённого реестра. Научная новизна исследования заключается в применении для реализации доверенного взаимодействия технологии распределённого реестра для объединения показаний отдельных цепочек блоков взаимодействия устройств киберфизической системы, которые могут быть использованы для последующего анализа полученных данных с целью обнаружения аномальных значений поведения агентов и выявления вредоносных воздействий нарушителей. Информация о действиях агентов агрегируется с использованием распределённого реестра через заданные интервалы времени и используется для расчёта значения доверия с использованием машинного обучения. Практическая значимость предлагаемых решений обусловлена факторами достижения за счёт предлагаемых технических решений высоких показателей защищённости агентов в децентрализованной киберфизической среде от вредоносного воздействия со стороны нарушителя, что позволит повысить отказоустойчивость.

Ключевые слова: доверенное взаимодействие, информационная безопасность, технологии распределённого реестра, киберфизические системы

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Минцифры России (грант ИБ, проект № 27/22-к).

**METHOD FOR TRUSTED INTERACTION OF AGENTS IN DECENTRALIZED
CYBER-PHYSICAL ENVIRONMENT BASED ON DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGY**

Petrenko Vyacheslav I., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Head of Department, ORCID: 0000-0003-4293-7013, e-mail: vipetrenko@ncfu.ru

Tebueva Fariza B., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Department, ORCID: 0000-0002-7373-4692, e-mail: ftebueva@ncfu.ru

Struchkov Igor V., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-8744-498X, e-mail: selentar@bk.ru

Pavlov Andrey S., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Senior Lecturer, ORCID: 0000-0002-8413-8706, e-mail: anspavlov@ncfu.ru

Ryabtsev Sergey S., North Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation,

Senior Lecturer, ORCID: 0000-0002-1428-6711, e-mail: nalfartorn@yandex.ru

Recent growth of popularity of cyber-physical systems actualizes the issues of ensuring trusted interaction of agents. In most works devoted to this topic, the proposed methods are tested in laboratory conditions and do not take into account the hostile external environment. At the same time, along with traditional threats to information security, cyber-physical systems are subject to a number of specific threats. The aim of the work is to increase the performance of agents of a decentralized cyber-physical system by providing trusted interaction between them using a distributed ledger. The scientific novelty of the research lies in the use of a distributed ledger to implement the trusted interaction. Combining the readings of individual blocks enables detection of anomalous behavior of agents and malicious effects of violators. Information about agents' actions is aggregated at a specified rate and is used to calculate the trust value by means of machine learning. The practical significance of the proposed solutions is increased fault tolerance of the cyber-physical system. It is achieved due to high values of the agents' security indicators.

Keywords: trusted interaction, information security, distributed ledger technologies, cyber-physical systems

Financial support: the study was financially supported by the Russian Ministry of Digital Development (IB grant, project no. 27/22-к).

Graphical annotation (Графическая аннотация)



ВВЕДЕНИЕ

Киберфизические системы (КФС) являются активно развивающейся областью техники. Популярность применения КФС связана с ростом автоматизации, которая приводит к интеграции вычислений с физическими процессами. КФС используют связь между разнородными физическими объектами при различных технологиях беспроводной передачи данных, таких как радиочастотная идентификация, беспроводные сенсорные сети [1]. Агенты подобных систем взаимодействуют в киберфизической среде и находят приложения в таких областях, как медицина, управление дорожным движением и безопасностью, групповая робототехника, системы вооружения и связи и т. д.

КФС совместно с системами связи осуществляют контроль за физическими процессами обычно путём передачи данных через узлы системы централизованно, где процессы влияют на вычисления и наоборот. На практике при решении ряда задач, требующих покрытия больших пространств, эффективным является децентрализованное взаимодействие между отдельными устройствами КФС.

В большинстве работ предлагаемые методы не учитывают наличие угроз информационной безопасности (ИБ). При этом, наряду с традиционными угрозами ИБ, КФС подвержены угрозам реализации специфических атак за счёт системных свойств КФС, например, вредоносных воздействий нарушителей при реализации ДВ. Под вредоносным воздействием понимаются действия узлов децентрализованной системы, которые демонстрируют непоследовательное поведение независимо от основной причины. Наличие таких при реализации ДВ может привести к невозможности выполнить целевую функцию КФС.

Таким образом, ИБ – это одна из проблем, влияющих на эффективность работы агентов в КФС [2]. Часто для решения проблемы ИБ используются механизмы “Hard Security” [3]. Однако подобные механизмы не обеспечивают надёжность КФС при наличии злонамеренных действий со стороны инсайдера из-за изменения его поведения. Методы доверительного управления [4, 5] решают эту проблему, измеряя степень уверенности в поведении, ожидаемом другими. Концепция доверия относится к категории “Soft Security”. Эти решения связаны с поддержанием репутации, которая определяет общее представление о поведении объекта. Доверие исследовалось для различных областей, таких как социальные сети, WSN [6], P2P [4], MANET [7]. В работе [8] представлен обзор проблем ДВ в КФС. Однако данная работа не охватывает важные аспекты доверительного управления, такие как тип используемой математической модели и принятая архитектура. Вопросы обеспечения ИБ ДВ в КФС являются актуальным направлением исследований, а выявление вредоносных воздействий нарушителей при реализации ДВ агентов в децентрализованной киберфизической среде (ДКФС) становится одним из главных барьеров для применения КФС на практике.

Данная работа построена следующим образом. В первой части представлено описание общей модели доверенного взаимодействия. Проведён анализ подходов к вычислению значения доверия. Во второй части выполнена постановка задачи. Третья – посвящена разработке метода доверенного взаимодействия агентов в ДКФС на основе технологии распределённого реестра. В четвёртой части представлены результаты количественной оценки влияния внедрённых вредоносных агентов на функционирование КФС в процессе выполнения задач и принятия решений в ДКФС.

ОБОБЩЁННАЯ МОДЕЛЬ ДОВЕРЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В общем виде архитектура модели доверенного взаимодействия в ДКФС выглядит как показано на рисунке 1 и состоит из следующих шагов.

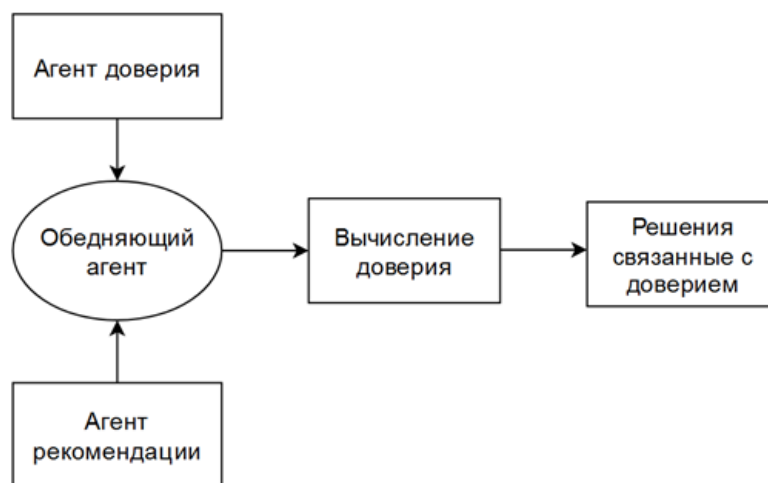


Рисунок 1 – Архитектура модели доверия

На рисунке под агентами имеются ввиду сущности, способные выполнять рекомендации – сообщаемую информацию о доверии, содержащую сведения о репутации. Только агенты могут отправлять и получать рекомендации, но при этом любая сущность может иметь репутацию. Репутация представляет собой объединение имени агента, категории доверия и значения доверия. Агенты доверия находятся на каждом устройстве КФС и выполняют задачу вычисления значения доверия, то есть отслеживают и регистрируют различные события, зависящие от контекста, в пассивном режиме. Возможные события, которые могут быть зарегистрированы в пассивном режиме, являются: данные, используемые для коллективного принятия решений, меры с точностью физических показателей, а также пакеты управления. Агент рекомендаций получает и отправляет рекомендации от узлов относительно их репутации. Обмен рекомендациями (репутацией) между агентами КФС может осуществляться периодически или по запросу. Объединяющий агент обрабатывает вычисления доверия и рекомендации. Чтобы вычислить общее значение доверия целевого узла, «объединитель» объединяет долю прямого доверия и долю рекомендации. Существует большое количество подходов к вычислению значения доверия (рис. 2).

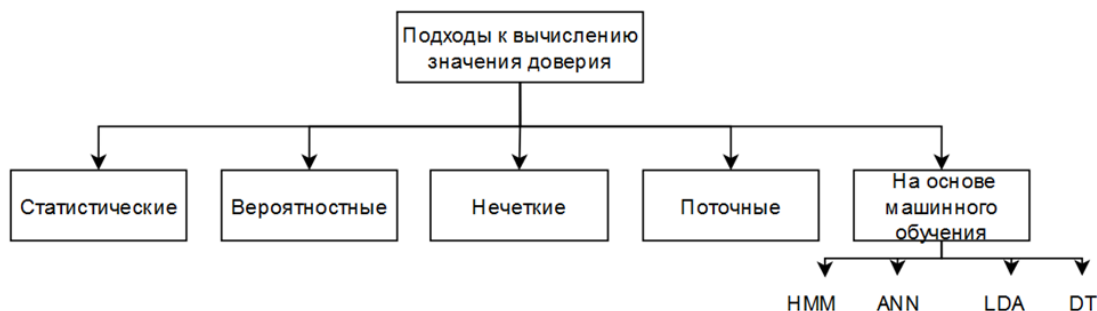


Рисунок 2 – Подходы к вычислению значения доверия

Для оценки значения доверия можно использовать различные подходы, включая статистические модели, вероятностные модели, нечёткие модели и алгоритмы машинного обучения. Статистические модели выполняют простые математические операции над обратной связью каждой транзакции для измерения степени доверия [9]. Вместо дискретных значений входа вероятностные модели используют вероятности возникновения событий [10] на основе неопределённости сети, а нечёткие модели используют правила нечёткого вывода для оценки доверия и качественных измерений [11]. Алгоритмы машинного обучения можно использовать для анализа будущего поведения объектов на основе анализа их предыдущих взаимодействий [12–14]. В алгоритмах на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) обучение применяется для преобразования входного вектора показателей в значение доверия. В поточных моделях значение доверия вычисляется итеративно с учётом длинной цепочки транзитивных отношений между объектами. При расчёте репутации учитываются мнения других объектов в системе [15]. Входящий поток и исходящий поток, сосредоточенный на объекте, используются для обновления значения доверия этого объекта.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Главной целью доверенного взаимодействия между устройствами ДКФС является повышение безопасности всей подсети, которые эти самые устройства и образуют. Нарушение деятельности одного агента общей группы может повлечь за собой негативные последствия всей для системы в виде принятия неправильного решения или задержки при выполнении целевой задачи, взаимодействующей с этой группой.

В общем виде задача расчёта доверия заключается в определении для агента A_i репутации по средствам сравнения показателей его функционирования с аналогичными параметрами каждого агента в пределах локальной связи и расчёте показателя значения доверия T . На основании этого критерия требуется соотнести агента к одному из двух классов: обычный агент, с которым можно взаимодействовать, или вредоносный агент, которого необходимо заблокировать при коллективном поведении так, что $\forall A_i \exists! k, A_i \in T_k$, где T_0 – обычный агент; T_1 – вредоносный агент.

Вербально постановка научной задачи может быть сформулирована следующим образом: необходимо обучить ИНС, используемую как модуль прошивки КФС, для уменьшения числа ложных срабатываний при обнаружении вредоносного воздействия с сохранением или улучшением эффективности функционирования КФС.

Формально постановка научной задачи имеет следующий вид. Необходимо получить такой метод:

$$Z: A, T, Q, F \rightarrow \Delta f_i \geq 0, f_i \in F, \quad (1)$$

где $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ – КФС численностью m ;

Q – множество рассматриваемых критериев оценки функционирования КФС;

Δf – изменение числа ложных срабатываний $\Delta f_i = f_i^n - f_i^d$, где индекс «д» значит «до использования предложенных решений», индекс «п» – «после использования предложенных решений».

МЕТОД ДОВЕРЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЁННОГО РЕЕСТРА

Предлагаемое решение базируется на применении подхода на основе моделей потока и методов машинного обучения. Предлагается вычислять доверие итеративно с учётом длинной цепочки транзитивных отношений между объектами. С учётом специфики ДКФС для этой цели предлагается использовать технологии распределённого реестра (ТРР). Преимущества использования ТРР обусловлены сходством базовых принципов организации взаимодействия агентов в ДКФС с принципами построения распределённых систем хранения и обработки данных [16], такими как децентрализация, одноранговость, масштабируемость. Цели использования алгоритмов достижения консенсуса в блокчейн-системах также схожи с целями агентов в ДКФС. Во-первых, блокчейн является распределённой системой принятия решений, предназначенной для работы в условиях недостатка

доверия между сторонами, что соответствует условиям функционирования КФС. Во-вторых, блокчейн-системы имеют встроенные механизмы поддержания актуальности информации, и, таким образом, КФС, построенные с применением таких технологий, не нуждаются в дополнительных узлах для подтверждения записей. В-третьих, потеря отдельного агента КФС не должна представлять угрозы для процесса выполнения целевой задачи, как и потеря отдельного узла децентрализованной блокчейн-системы. Практические сложности применения ТРР, как правило, заключаются в существенной трудоемкости алгоритмов достижения консенсуса и аппаратных затрат в блокчейн и, как следствие, снижении скорости взаимодействия агентов. По этой причине в данной работе применяется простая реализация распределённого реестра, не использующая шифрование и хэш-функции. Алгоритм предлагаемого метода расчёта значения доверия представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Алгоритм метода расчёта значения доверия

Информацию о состоянии среды агент собирает с использованием бортовых датчиков и сенсоров, а также посредством информационного обмена с другими агентами РРТС. Каждый агент получает информацию по каналу связи лишь от нескольких соседних агентов, расположенных в области видимости. Информационный обмен между агентами КФС осуществляется посредством широковещательной или групповой рассылки сообщений. Так как дальность действия бортовых средств связи агентов КФС ограничена, то агент, сгенерировавший сообщение, рассылает его агентам в своей области видимости, после чего соседние агенты пересылают сообщения далее «по цепочке», то есть выступают ретрансляторами. Данный подход, с одной стороны, привносит в информационный обмен избыточность данных, а с другой стороны, компенсирует нестабильность каналов связи, что особенно актуально при функционировании агентов КФС в ДКФС. При формировании реестра агент при встрече с другим агентом в ДКФС на протяжении времени сохранения локальной связи выполняет процедуру распространения накопленной БД. Распространение происходит путём деления БД на блоки данных, соответствующих каждому отдельному агенту, и отправки этих блоков другим агентам. Приняв DataUnit, агент должен обновить соответствующий блок у себя в БД (DataStore), если метка времени принятого блока актуальнее уже имеющихся блоков в БД или если локальный блок не найден. Через некоторое время с начала работы у большинства агентов в ДКФС накапливается распределенная БД измерений других агентов. Данный подход позволяет использовать цепочку взаимодействий агентов в ДКФС и принимать решения о доверительном взаимодействии. В данной работе агенты, которым в результате выполнения предлагаемых процедур присвоена низкая оценка значения доверия, были заблокированы для коллективного взаимодействия. Данная задача является проблемой коллективного распознавания, описанной в работе [17], отличием является отсутствие строгих ограничений, присущих роевым системам.

На рисунке 4 представлена структура данных сообщений, которые передаются между агентами КФС. Поле «Признаки» (features) содержит ассоциативный массив, где ключами являются отдельно взятые параметры состояния агента (Feature), а значениями – соответствующие показатели этих параметров в формате числа с плавающей запятой. Поле «Метка времени» (updateTime) используется в процессе КПП между агентами КФС для обновления локальных БД.

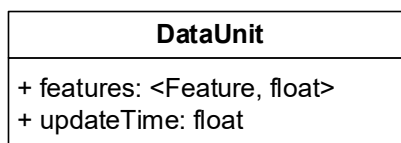


Рисунок 4 – Пример структуры данных, описывающей текущее состояние агента КФС

Оценку уровня доверия в настоящей работе предлагается осуществлять при каждой инициализации акта коммуникации агента A_j с агентом $A_i, j \neq i$. Для этого агенту A_i необходимо получить наиболее свежий DataUnit агента A_j путём запроса соседних агентов, находящихся в пределах дальности действия бортовых средств связи. Данное ограничение накладывается на систему вследствие её децентрализованной природы.

Полученный агентом A_i DataUnit, содержащий наиболее актуальную информацию об агенте A_j , может содержать огромное количество признаков, что существенно затрудняет аналитическую оценку уровня доверия T_j агента A_j . Поэтому в настоящей работе предлагается реализация данной процедуры с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). В качестве ИНС предлагается использовать циклическую генеративно-состязательную архитектуру искусственной нейронной сети [18]. Схематическое представление процесса обучения циклической генеративно-состязательной искусственной нейронной сети показано на рисунке 5.

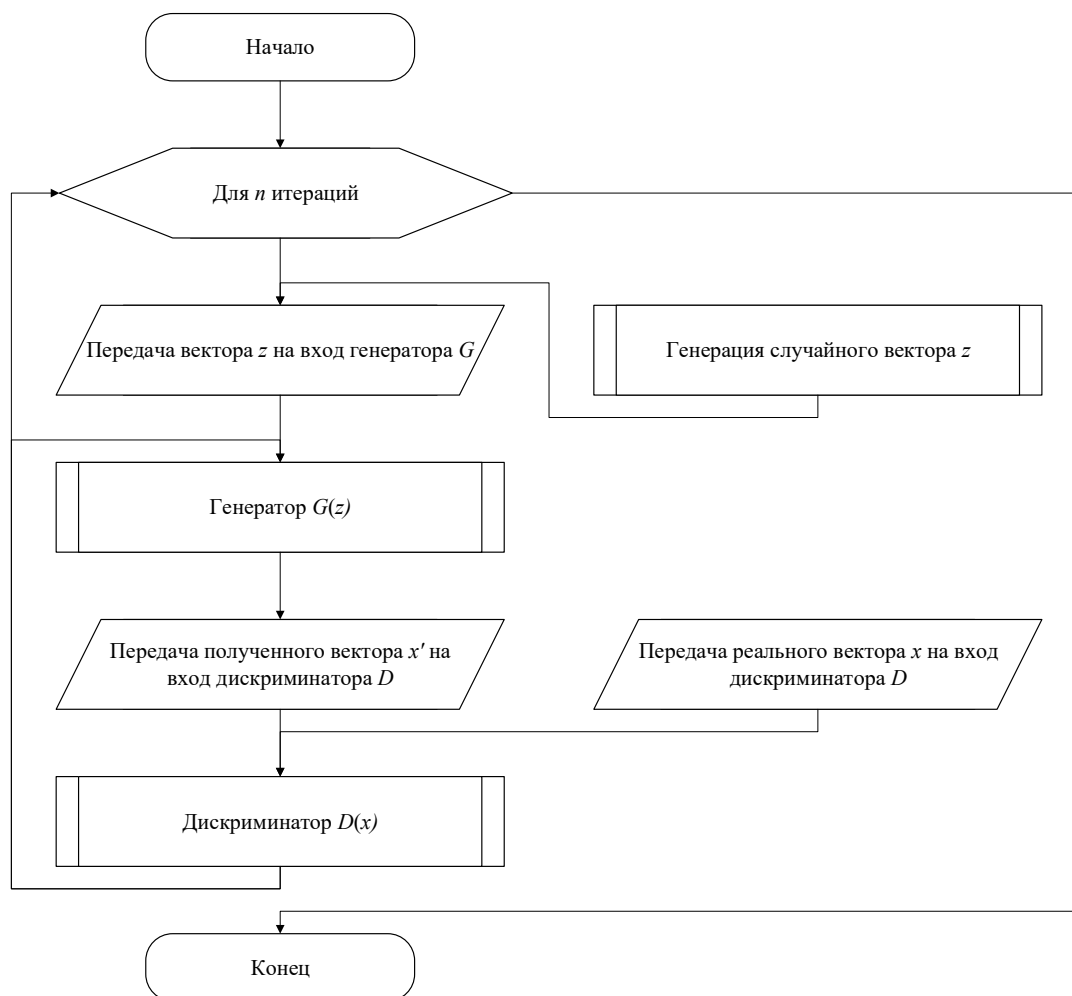


Рисунок 5 – Блок-схема процесса обучения искусственной нейронной сети с циклической генеративно-состязательной архитектурой

Основной идеей генеративно-сопоставительной архитектуры искусственной нейронной сети является использование двух нейронных сетей: генератор и дискриминатор. Генератор, обозначенный на рисунке как G , предназначен для формирования таких входных векторов x' , которые позволят повысить точность классификации дискриминатора D за счёт увеличения размера обучающей выборки и вариативности образцов. В качестве входа генератор G принимает случайный вектор z и преобразует его таким образом, чтобы выходной вектор x' был максимально подобен реальным данным x . Дискриминатор, в свою очередь, получает на вход два вектора: реальный вектор x и полученный с помощью генератора вектор x' . Задачей дискриминатора является классификация, является ли текущее состояние агента A_j аномальным, а также формирование обратной связи для генератора G , что используется для повышения «подобия» генерируемых данных. Циклическая модификация генеративно-сопоставительной архитектуры искусственной нейронной сети предполагает итеративность обучения каждой из сетей. Для этого эмпирически подбирается количество итераций n в зависимости от количества образцов в обучающей выборке реальных данных X и требуемой точности выявления аномального состояния агентов КФС.

Таким образом, целевая функция обучения циклической генеративно-сопоставительной искусственной нейронной сети может быть представлена следующим образом:

$$\min G \max D V(D, G) = E_{x \sim p(x)} \log D(x) + E_{z \sim q(z)} \log (1 - D(G(z))), \quad (2)$$

где $D(x)$ – дискриминатор;

$G(z)$ – генератор;

$p(x)$ – плотность распределения реальных данных;

$q(z)$ – плотность распределения сгенерированных данных;

E – ожидаемый выход нейронной сети.

В качестве агентов КФС в настоящей работе рассматриваются мобильные агенты. Однако при анализе наборов данных для обучения (датасетов), находящихся в открытом доступе, было обнаружено, что они, как правило, содержат признаки либо физической, либо информационной компоненты агентов КФС. Поэтому для учета таких параметров, как линейная и угловая скорости, ускорение и т. д. мобильных агентов проведено смешивание датасетов, представленных в работах [19] и [20] в соответствии с метками классов в различных вариациях. Таким образом, полученный датасет составил 5171 образец, из которых 29 % являются аномальными данными, 71 % – нормальными. В соответствии с распределением аномальных и нормальных состояний агентов в используемом датасете значение n в настоящей работе составляет 10000 итераций, исходя из того, что на начальных этапах обучения большая часть получаемых векторов x' будут классифицированы как аномальные состояния. Таким образом, этот подход позволит сбалансировать обучающую выборку, что в свою очередь, обеспечит повышение точности классификации аномального состояния агентов КФС.

В качестве алгоритма обучения обеих моделей нейронных сетей использован градиентный спуск. Каждая из моделей нейронной сети состоит из входного, выходного и трех скрытых слоев. Входной и выходной слои генератора состоят из 159 нейронов (комбинация из 127 и 32 признаков в соответствии с первым и вторым исходными датасетами), скрытые слои – из 512. Входной и выходной слои дискриминатора состоят из 318 и 1 нейронов соответственно. В качестве функции активации использована нелинейная функция активации LeakyRELU. При этом для выходного слоя генератора использована функция активации синусоида, а для выходного слоя дискриминатора – softmax. Более наглядное представление архитектур генератора и дискриминатора представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Архитектура моделей генератора и дискриминатора

Наименование слоя	Размерность слоя	Функция активации
Генератор		
Входной слой	159	LeakyRELU
Скрытый слой	512	LeakyRELU
Скрытый слой	512	LeakyRELU
Скрытый слой	512	LeakyRELU
Выходной слой	159	LeakyRELU
Дискриминатор		
Входной слой	318	LeakyRELU
Скрытый слой	512	LeakyRELU
Скрытый слой	512	LeakyRELU
Скрытый слой	512	LeakyRELU
Выходной слой	1	LeakyRELU

После завершения обучения дискриминатора D верификация полученной модели искусственной нейронной сети осуществляется следующим образом. Весовые коэффициенты всех скрытых слоев и выходного слоя замораживаются (сохраняются в файл), а входной слой заменяется на слой требуемой размерности. Схематическое представление архитектуры классификатора подозрительных писем показано на рисунке 6.

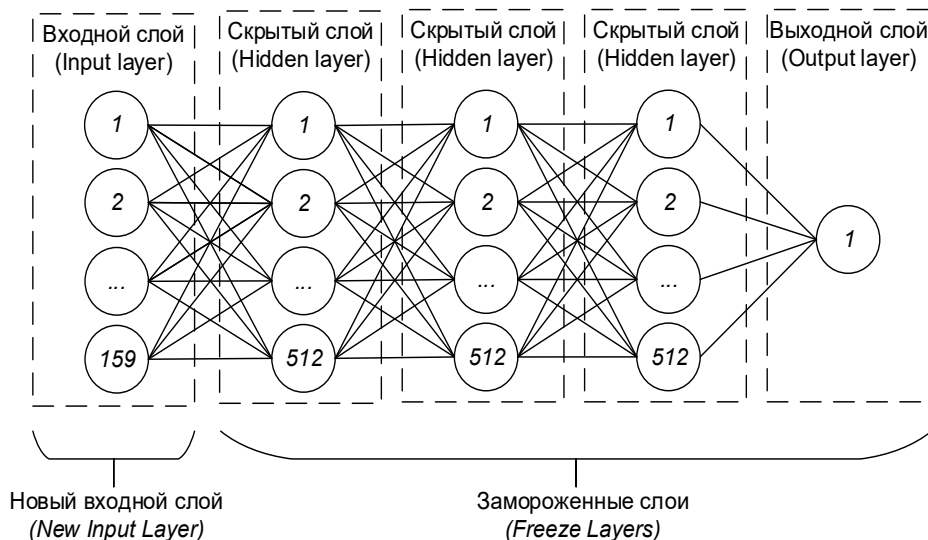


Рисунок 6 – Архитектура предложенного классификатора

Так, например, количество нейронов входного слоя m составило 127 вместо 254 (модель принимает один вектор вместо двух), а на выходе – по-прежнему один нейрон с функцией активации softmax, определяющий степень принадлежности входного сообщения x к тому или иному классу, что и определяет уровень доверия агента A_i к агенту A_j .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве метода-аналога (МА) рассматривается работа [21], в которой авторы для выявления аномального состояния агентов также использовали искусственные нейронные сети. Для проведения эксперимента была выполнена программная реализация методов на языке программирования Python. Формирование графиков для оценки эффективности выявления аномального состояния агентов КФС выполнено с помощью библиотеки Matplotlib. При проведении симуляции был использован компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-8550U с тактовой частотой 1,8 ГГц, 8 ГБ оперативной памяти. Используются параметры моделирования, указанные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры моделирования

Наименование параметра	Значение
Количество агентов КФС	100
Количество вредоносных агентов КФС	10 %, 25 %, 50 %
Количество экспериментов	100

Для оценки эффективности разработанного метода предлагается использовать метрики точности выявления вредоносных агентов (3) и процентного соотношения количества ложных результатов к общему количеству результатов (4):

$$\frac{s_p}{v}, \quad (3)$$

где s_p обозначает количество правильных результатов;

v – количество вредоносных агентов в КФС.

$$\frac{s_n}{s_p + s_n}, \quad (4)$$

где s_n – количество ложных результатов.

Графически результаты моделирования и сравнения разработанного метода (РМ) и МА представлены на рисунках 7–9.

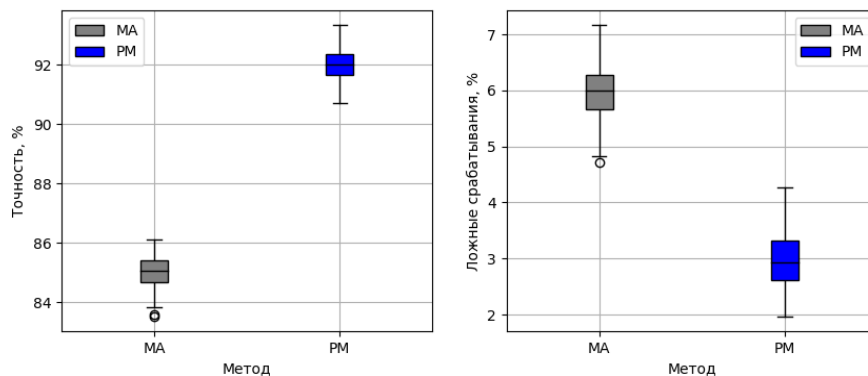


Рисунок 7 – Результаты моделирования КФС с 10 вредоносными агентами

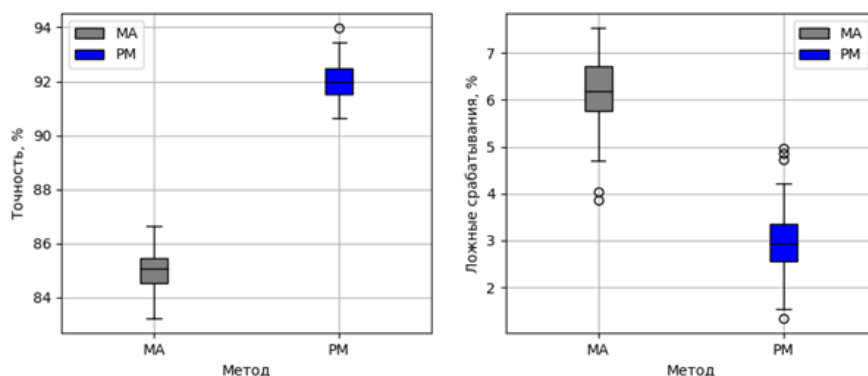


Рисунок 8 – Результаты моделирования КФС с 25 вредоносными агентами

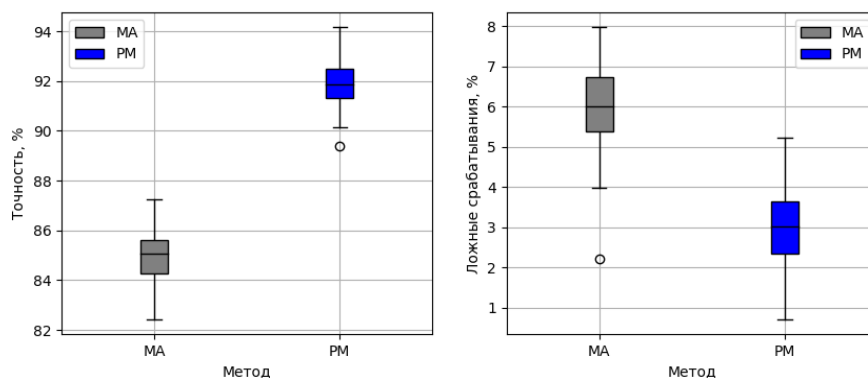


Рисунок 9 – Результаты моделирования КФС с 50 вредоносными агентами

Более детальные результаты проведённого моделирования с учётом максимальных, средних и минимальных значений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сводные результаты проведённого моделирования

Критерий	Точность, %		Ложные срабатывания, %	
	100 агентов / 10 вредоносных агентов			
Метод	МА	РМ	МА	РМ
Максимальное значение	86,1	93,34	7,17	4,28
Среднее значение	85,0	92,01	5,94	2,98
Минимальное значение	83,51	90,69	4,71	1,96
100 агентов / 25 вредоносных агентов				
Метод	МА	РМ	МА	РМ
Максимальное значение	86,64	93,98	7,54	4,97
Среднее значение	85,03	92,03	6,2	2,97
Минимальное значение	83,22	90,63	3,86	1,34
100 агентов / 50 вредоносных агентов				
Метод	МА	РМ	МА	РМ
Максимальное значение	87,26	94,17	7,98	5,23
Среднее значение	85,02	91,93	6,03	2,98
Минимальное значение	82,42	89,37	2,23	0,71

Согласно данным, приведённым в таблице 3, точность выявления вредоносных агентов составляет ~92 % против ~85 % с использованием метода-аналога. Помимо этого, предложенное решение позволяет уменьшить количество ложных срабатываний с 6 до 3 %. Это объясняется тем, что в представленном решении используется большее количество признаков, а также обучающая выборка большей размерности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен вопрос ИБ доверенного взаимодействия агентов в ДКФС и расчёта значения доверия с использованием машинного обучения на основе технологии распределённого реестра при наличии вредоносного воздействия. Новизной предлагаемых решений является использование генеративно-состязательной архитектуры искусственной нейронной сети для оценки доверия с помощью данных о взаимодействии агентов, агрегируемых в распределённом реестре. Результаты проведённых экспериментальных исследований подтверждают повышение точности выявления вредоносных агентов по сравнению с аналогом с ~85 до ~92 % при уменьшении числа ложных срабатываний.

Разработанный метод предполагает непрерывное выполнение на протяжении всего времени функционирования КФС. Областью практического использования данного метода являются задачи, при которых необходимо обеспечить приемлемый уровень ИБ агентов КФС в ДКФС при наличии вредоносных или неисправных устройств, а также требующие продолжительного выполнения, например, мониторинг местности, поиск объектов, наблюдение и т. д. К будущим направлениям работы следует отнести разработку более сложных механизмов блокировки и противодействия выявленным вредоносным агентам.

Список источников

1. Grgurevich, I. Application of the concept of the Internet of Things in the carsharing system / I. Grgurevich, D. Perakovich, I. Forenbacher, T. Milinovich // International Scientific book DAAAM. – 2015. – P. 401–414.
2. Sikari, S. Security, confidentiality and trust in the Internet of Things: the way forward / S. Sikari, A. Rizzardi, L. A. Greco, A. Koen-Porisini // Computer Networks. – 2015. – Vol. 76. – P. 146–164.
3. Josang, A. Can we manage trust? / A. Josang, K. Keser, T. Dimitrakos // Architectural notes on Computer Science. – 2005. – Vol. 3477. – P. 93–107.
4. Josang, A. Review of trust and reputation systems for providing online services / A. Josang, R. Ismail, K. Boyd // Decision support Systems. – 2007. – Vol. 43, № 2. – P. 618–644.
5. Kaur, J. The multicast method in IoT based on trust / J. Kaur, N. Kaur // International Journal on New Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, № 8. – P. 4574–4579.
6. Lopez, H. Systems of trust management of wireless sensor networks: best practices / H. Lopez, R. Roman, I. Agudo, K. F. Gago // Computer communications. 2010. – Vol. 33, № 9. – P. 1086–1093.
7. Ahmed, A. Research on the detection and isolation of malicious nodes based on trust in special and sensor networks / A. Ahmed, K. Abu Bakar, M. I. Channa, H. Hasib // Frontiers of Computer Science. – 2015. – Vol. 9, № 2. – P. 280–296.
8. Yehiya, L. Hybrid security methods for medical applications of the Internet of Things / L. Yehia, A. E. Darvish, A. Khedr // Achievements in the field of the Internet of Things. – 2015. – Vol. 05, № 03. – P. 21–25.
9. Flammini, F. Digital doubles as predictive models of stability of cyberphysical systems during execution: a conceptual framework / F. Flammini // Philosophical Transactions of the Royal Society of Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 379, № 2207.
10. Wang, Ya. Quantitative assessment of trust for network cyberphysical systems / Ya. Wang // IEEE Journal "Internet of Things". – 2018. – Vol. 5, № 3. – P. 2055–2070.
11. Chen, D. TRM-IoT: A model of trust management based on the fuzzy reputation of the Internet of Things / D. Chen, G. Chang, D. Song, C. Li // Informatics and Information Systems. – 2011. – Vol. 8, № 4. – P. 1207–1228.
12. Liu, L. CPMA attack detection system based on trust assessment and machine learning in the Internet of Things network / L. Liu, S. Xu, Yu. Liu, Ts. Ma // IEEE Journal "Internet of Things". – 2021. – Vol. 8, № 20. – P. 15249–15258.
13. Ali, A. Detection of cyberattacks in healthcare using cyber-physical systems and machine learning methods / A. Ali, M. Al-Maita, A. Alarifi // Soft Comput. – 2021. – Vol. 25, № 18. – P. 12319–1232.
14. Lew, J. Ensuring the security of autonomous cyber-physical systems through verifiable information flow management / J. Lew, J. Corbet-Davis, A. Ferraiuolo, A. Ivanov // Proc. ACM Conf. Comput. Commun. Secur. Association for Computing Machinery. – 2018. – P. 48–59.
15. Shikato, H. Introduction of Deep Learning Technology Blockchain Secure Framework for a cyberphysical system / H., Shikato, J. Cha, Y. Pan, J. C. Park // Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering. – 2021. – Vol. 716. – P. 195–200.
16. Valentini, G. Collective perception of environmental features in a swarm of robots / G. Valentini, D. Brambilla // Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics). – Springer, Cham, – 2016. – Vol. 9882 LNCS. – P. 65–76.
17. Kluger, F. Cyclically consistent data augmentation based on the region for object detection / F. Kluger, K. Reynders, K. Raetz, F. Shelske // Proc. – 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data) 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2019. – P. 5205–5211.

18. Ahmed, Ch. M. WADI: Test bench for water distribution for research in the field of design of protected cyberphysical systems / Ch. M. Ahmed, V. R. Palleti, A. Mathur // Proc. – 2017 3rd International Seminar. CySWATER 2017. Association for Computing Machinery, Inc. – 2017. – P. 25–28.

19. Santoso, F. A data-driven cyberphysical system using convolutional neural networks of deep learning: A study of attacks on entering false data into an unmanned ground vehicle in fault-tolerant conditions / F. Santoso, R. A. Finn // IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2023. – Vol. 53, № 1. – P. 346–356.

20. Liu, Zh. Adaptive neural network management for nonlinear cyberphysical systems subject to attacks with false data entry, with a given performance / Zh. Liu, Tsz. Tang, Zh. Zhao, Sh. Zhang // Philosophical Transactions of the Royal Society of Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 379. – P. 2207.

References

1. Grgurevich, I., Perakovich, D., Forenbacher, I., Milinovich, T. Application of the concept of the Internet of Things in the carsharing system. *International Scientific book DAAAM*, 2015, pp. 401–414.

2. Sikari, S., Rizzardi, A., Greco, L. A., Koen-Porisini, A. Security, confidentiality and trust in the Internet of Things: the way forward. *Computer Networks*, 2015, vol. 76, pp. 146–164.

3. Josang, A., Keser, K., Dimitrakos, T. Can we manage trust? *Architectural notes on Computer Science*, 2005, vol. 3477, pp. 93–107.

4. Josang, A., Ismail, R., Boyd, K. Review of trust and reputation systems for providing online services. *Decision Support Systems*, 2007, vol. 43, no. 2, pp. 618–644.

5. Kaur, J., Kaur, N. The multicast method in IoT based on trust. *International Journal on New Trends in Engineering Research*, 2020, vol. 8, no. 8, pp. 4574–4579.

6. Lopez, H., Roman, R., Agudo, I., Gago, K. F. Systems of trust management of wireless sensor networks: best practices. *Computer Communications*, 2010, vol. 33, no. 9, pp. 1086–1093.

7. Ahmed, A., Abu Bakar, K., Channa, M. I., Hasib, H. Research on the detection and isolation of malicious nodes based on trust in special and sensor networks. *Frontiers of Computer Science*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 280–296.

8. Yehia, L., Khedr, A. E., Darvish, A. Hybrid security methods for medical applications of the Internet of Things. *Achievements in the field of the Internet of Things*, 2015, vol. 05, no. 03, pp. 21–25.

9. Flammini, F. Digital doubles as predictive models of stability of cyberphysical systems during execution: a conceptual framework. *Philosophical Transactions of the Royal Society of Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2021, vol. 379, no. 2207.

10. Wang, Ya. Quantitative assessment of trust for network cyberphysical systems. *IEEE Journal "Internet of Things"*, 2018, vol. 5, No. 3, pp. 2055–2070.

11. Chen, D., Chang, G., Song, D., Li, C. TRM-IoT: A model of trust management based on the fuzzy reputation of the Internet of Things. *Informatics and Information Systems*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 1207–1228.

12. Liu, L., Xu, S., Liu, Yu., Ma, Ts. CPMA attack detection system based on trust assessment and machine learning in the Internet of Things network. *IEEE Journal "Internet of Things"*, 2021, vol. 8, no. 20, pp. 15249–15258.

13. Ali, A., Al-Maita, M., Alarifi, A. Detection of cyberattacks in healthcare using cyber-physical systems and machine learning methods. *Soft Comput.*, 2021, vol. 25, no. 18, pp. 12319–1232.

14. Lew, J., Corbet-Davis, J., Ferraiuolo, A., Ivanov, A. Ensuring the security of autonomous cyber-physical systems through verifiable information flow management. *Proc. ACM Conf. Comput. Commun. Secur. Association for Computing Machinery*, 2018, pp. 48–59.

15. Shikato, H., Cha, J., Pan, Y., Park, J. C. Introduction of Deep Learning Technology Blockchain Secure Framework for a cyberphysical system. *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2021, vol. 716, pp. 195–200.

16. Valentini, G., Brambilla, D. Collective perception of environmental features in a swarm of robots. *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*. Springer, Cham, 2016, vol. 9882 LNCS, pp. 65–76.

17. Kluger, F., Reynders, K., Raetz, K., Shelske, F. Cyclically consistent data augmentation based on the region for object detection. *Proc. – 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data) 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2019, pp. 5205–5211.

18. Ahmed, Ch. M., Palleti, V. R., Mathur, A. WADI: Test bench for water distribution for research in the field of design of protected cyberphysical systems. *Proc. 3rd International Seminar. CySWATER 2017. Association for Computing Machinery, Inc.*, 2017, pp. 25–28.

19. Santoso, F., Finn, R. A. A data-driven cyberphysical system using convolutional neural networks of deep learning: A study of attacks on entering false data into an unmanned ground vehicle in fault-tolerant conditions. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2023, vol. 53, no. 1, pp. 346–356.

20. Liu, Zh., Tang, Tsz., Zhao, Zh., Zhang, Sh. Adaptive neural network control for nonlinear cyber-physical systems subject to false data injection attacks with prescribed performance. *Philosophical Transactions of the Royal Society Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2021, vol. 379, no. 2207.

Статья поступила в редакцию 24.04.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023; принята к публикации 03.05.2023.

The article was submitted 24.04.2023; approved after reviewing 02.05.2023; accepted for publication 03.05.2023.

УДК 004.056

НАВЯЗЫВАНИЕ ЗАВЕДОМО ЛОЖНОЙ ИНФОРМАЦИИ ВРЕДОНОСНЫМИ ПАРСЕРАМИ

Демина Раиса Юрьевна, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, ORCID: 0009-0009-1615-5641, e-mail: raisa.demina.91@mail.ru

Гурская Татьяна Геннадиевна, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0009-0000-8133-136, e-mail: gurskai@mail.ru

Шукралиева Динара Эдуардовна, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

аспирант, ORCID: 0000-0002-1221-132, e-mail: assistant_ib@asu.edu.ru

В последнее время наблюдается тенденция постоянного увеличения объёма создаваемого и выгружаемого в интернет контента. Одним из средств автоматизированного сбора разнообразного контента являются парсеры. Парсер – это программа, сервис или скрипт, который собирает данные с указанных веб-ресурсов, анализирует их и выдаёт в нужном формате. На сегодняшний день условно можно разделить парсеры на категории: легитимные и вредоносные (серый парсинг). Парсинг – это технический относительно новый термин. Существуют разные методы защиты от парсинга: юридические и технические. В рамках статьи предлагается расширенный подход к защите информации от несанкционированного копирования, добавив навязывание парсеру заведомо ложного контента.

Ключевые слова: парсер, бот-атаки, навязывание, пользовательское соглашение

LEGAL AND HARDWARE-SOFTWARE MEASURES TO PROTECT WEB RESOURCES FROM MALICIOUS PARSERS

Demina Raisa Yu., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: 0009-0009-1615-5641, e-mail: raisa.demina.91@mail.ru

Gurskaya Tatiana G., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0009-0000-8133-136, e-mail: gurskai@mail.ru

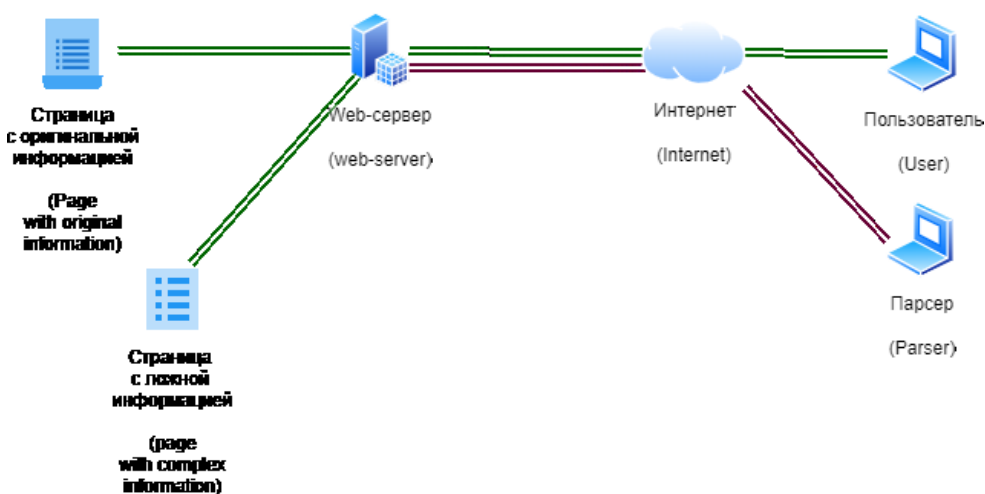
Shukralieva Dinara E., Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0002-1221-132, e-mail: assistant_ib@asu.edu.ru

Recently, there has been a trend of a constant increase in the volume of content created and uploaded to the Internet. Parsers are one of the means of automated collection of various content. A parser is a program, service, or script that collects data from specified web resources, analyzes them, and outputs them in the desired format. To date, parsers can be conditionally divided into categories: legitimate and malicious (gray parsing). Parsing is a relatively new technical term. There are different methods of protection against parsing: legal and technical. The article proposes an expanded approach to protecting information from unauthorized copying by adding the imposition of deliberately false content on the parser.

Keywords: parser, bot attacks, imposition, user agreement

Графическая аннотация (Graphical annotation)



ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается тенденция постоянного увеличения объёма создаваемого и выгружаемого в интернет контента. Развитие цифровых технологий привело к упрощению несанкционированного заимствования информационных ресурсов. Одним из средств автоматизированного сбора разнообразного контента являются парсеры.

Парсер – это программа, сервис или скрипт, который собирает данные с указанных веб-ресурсов, анализирует их и выдаёт в нужном формате. Процесс автоматизированного сбора информации из интернета, осуществляемый без использования API-сайтов, но с помощью роботов или программных парсеров с IT-ресурсов, называется парсингом. Основным направлением деятельности такого вида деятельности ботов является автоматизированный сбор персональных данных пользователей, интеллектуальной собственности, финансово-значимого контента. Технические меры по защите от автоматизированного сбора информации изучены во многих направлениях. Однако в российских нормативно-правовых актах нет однозначных норм об использовании автоматизированного сбора или парсеров [1].

На сегодняшний день условно можно разделить парсеры на категории: легитимные, вредоносные (серый парсинг).

С помощью парсеров можно решать полезные задачи. Например, поисковые системы используют парсинг для индексации сайтов и web-страниц. Алгоритм работы поисковой системы состоит из 3-х этапов:

- сканирование и поиск в интернете контента на каждом унифицированном указателе ресурса URL;
- индексирование и организация хранения, систематизации контента. Стоит отметить, что, как только страница индексируется, в результате выполнения соответствующих запросов можно её увидеть;
- ранжирование предоставленных фрагментов контента, которые соответствуют запросу пользователя. Результаты упорядочены в порядке от наиболее релевантного к наименее релевантному [2].

Легитимные парсеры могут использовать администраторы сайтов для анализа обнаружения страниц с ошибкой 404, редиректа, неработающих ссылок. Использование легитимных парсеров не противоречит интересам пользователей.

Кроме легитимного, существует также и серый парсинг. К задачам, которые он выполняет, относятся скачивание контента конкурентов или сайтов целиком, сбор контактных данных с агрегаторов и сервисов по типу Яндекс.Карт или 2Гис (для спам-рассылок и звонков). Серый парсинг также имеет определённую опасность для персональных данных пользователей web-ресурсов. Целью злоумышленников могут быть личные данные, интеллектуальная собственность, автомобильные штрафы.

Вредоносные парсеры обрели популярность, спрос на сбор информации для достижения поставленных целей злоумышленниками набирает обороты. В связи с этим для собственников информации стал более актуален вопрос защиты авторского права, поскольку недобросовестные конкуренты, злоумышленники всё чаще используют парсеры.

Компанией IMPERVA был произведён анализ источников трафика в интернете [1]. По данным исследования, в 2022 г. доля нежелательного роботизированного трафика составила 24 % от всего веб-трафика (рис. 1) [3].

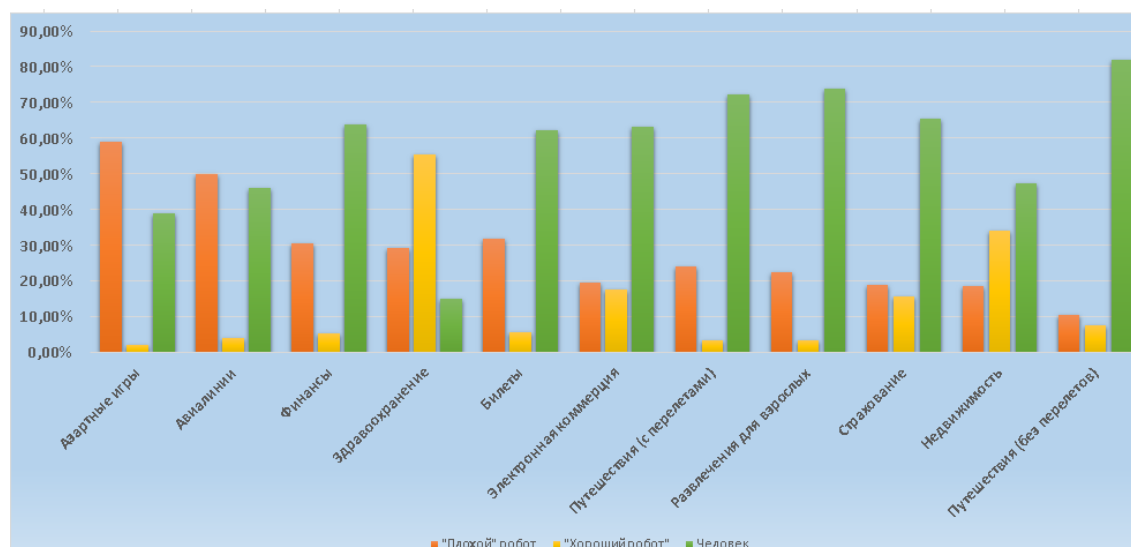


Рисунок 1 – Диаграмма исследования по инцидентам нежелательных программных роботов в 2022 г.

Согласно статистике, доля трафика, генерируемого вредоносными парсерами, превышает долю трафика, генерируемого легитимными парсерами и/или пользователями.

Парсеры могут создавать дополнительную нагрузку на web-серверы. В связи с этим владельцы информации сталкиваются с проблемой возможности влияния на этот процесс таким образом, чтобы случайно не заблокировать легитимных пользователей. Внедрённые механизмы защиты web-ресурсов от несанкционированного роботизированного копирования сведений создают дополнительные препятствия при авторизации легитимных пользователей. Помимо этого, в последнее время для собственников информации стал более актуален вопрос защиты авторского права, поскольку конкуренты и злоумышленники всё чаще недобросовестно используют парсеры. В этой связи статистика защищённых, доверенных web-ресурсов страдает.

Рост контента в интернете, цифровая трансформация привели к несанкционированному сбору информации с помощью парсинга. При этом парсеры создают дополнительную нагрузку на веб-серверы, препятствия для авторизации легальных пользователей и оказывают негативное влияние на репутацию web-сайтов.

ЮРИДИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАЩИТЫ ОТ ПАРСИНГА

Парсинг – это технический относительно новый термин, и в законодательстве отсутствует его основное определение, что осложняет правовую оценку данного явления.

Согласно статье 29 Конституции Российской Федерации, каждый вправе свободно искать и получать информацию любым законным способом [4]. Также согласно Федеральному закону «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» № 149 от 27 июля 2006 г.: «Информация, размещаемая её обладателями в сети «Интернет» в формате, допускающем автоматизированную обработку без предварительных изменений человеком в целях повторного ее использования, является общедоступной информацией, размещаемой в форме открытых данных» [5]. Следовательно, информация, выложенная без ограничений в интернете, является общедоступной, что означает, что данная информация доступна к сбору и дальнейшему анализу.

Стоит отметить, что если парсер взламывает пароль IT-ресурса, то действие злоумышленника подпадает под состав преступления «Неправомерный доступ к компьютерной информации» (статья 272 Уголовного кодекса), что грозит штрафом до 200 тысяч [6].

При анализе примечания к статье 272 Уголовного кодекса Российской Федерации «под компьютерной информацией понимаются сведения (сообщения, данные), представленные в форме электрических сигналов, независимо от средств их хранения, обработки и передачи». Таким образом, парсинг – это работа с компьютерной информацией. Но информация не общедоступная, а персональные данные, коммерческая тайна, и информация, которая является объектом интеллектуальной деятельности.

Парсер является программным обеспечением, и с этой точки зрения, в случае если парсеры используют злоумышленники, можно использовать для обеспечения защиты статью 273 Уголовного кодекса Российской Федерации – «Создание, использование и распространение вредоносных компьютерных программ».

В этом случае состав преступления – это использование компьютерных программ, предназначенных для несанкционированного копирования компьютерной информации. Статья 273 Уголовного кодекса Российской Федерации распространяется и на тех, кто использует «компьютерные программы для несанкционированного копирования компьютерной информации», и на тех, кто их «разрабатывает и распространяет». То есть теоретически отвечать будет тот, кто использовал парсер и кто его разработал.

Использование парсеров для умышленного нанесения ущерба или несанкционированного копирования информации влечёт за собой риск уголовной ответственности.

Нарушение пользовательского соглашения

На некоторых сайтах есть условия использования или пользовательские соглашения, относящиеся к категории «юридический документ», которая регулирует отношения между владельцами и пользователями сайта, приложения или программы, фиксирует права, обязанности и ответственность сторон, а также правила использования ресурса и контента. В пользовательском соглашении может оказаться пункт, запрещающий автоматизированное копирование. Следовательно, тот, кто парсит, тот нарушает пользовательское соглашение,

Для пользователей web-ресурсов непонятно, подписано ли пользовательское соглашение и необходимо ли это, если он планирует посетить информационную среду для чтения, просмотра.

Есть два типа соглашений:

1. Договор или лицензионное соглашение, которое осуществляется при переходе по ссылке (click-wrap). При этом типе необходимо нажать кнопку или поставить галочку «Я согласен с условиями». Для заключения «договора» пользователь жмёт на кнопку или ставит галочку, и тем самым «договор» заключён между владельцем ресурса и пользователем.

2. Договор или лицензионное соглашение, которое предусматривает самостоятельное ознакомление пользователем с условиями использования сайта (browse-wrap). При указанном типе соглашений «договор» находится на определённой странице сайта. Для ознакомления с ним необходимо либо перейти по гиперссылке или найти определённый контейнер, где хранится информация о пользовании web-ресурсов. Для заключения «договора» требуется, чтобы субъект выразил свою волю. В этом случае «договор» размещен на сайте, и если пользователь просто зашёл на сайт, то без дополнительных доказательств вряд ли можно однозначно сказать, что «договор» заключён.

Следует учитывать, что большинство сайтов не привязаны к персональным данным человека и доказать, что это именно этот человек заключил с владельцем web-ресурса пользовательское соглашение, сложно.

Есть разница между зарегистрированными пользователями ресурсов и незарегистрированными. Если процесс парсинга осуществляет зарегистрированный пользователь, то владелец сайта может применить санкции, предусмотренные «договором». Простейшая санкция – это бан, который юридически может являться приостановлением оказания услуг или расторжением «договора» в одностороннем порядке.

Интеллектуальная собственность

К интеллектуальной собственности относятся: произведения науки, литературы и искусства, компьютерные программы, базы данных, изобретения, селекционные достижения, товарные знаки, ноу-хау. При парсинге обычно приходится сталкиваться только с произведениями науки, литературы и искусства, а также с базами данных.

Контент сайта – тексты, фото, аудио, видео – иногда относится к произведениям науки, литературы или искусства, которые охраняются авторским правом. При парсинге контент копируется. С юридической точки зрения, копирование – это «воспроизведение» объекта интеллектуальных прав. Без разрешения автора оно запрещено.

Если контент распространяется на условиях открытой лицензии, которая разрешает копирование, то парсинг сам по себе не нарушает авторские права. Примером такого случая является интернет-энциклопедия «Википедия». Однако не всё в интернете находится под открытой лицензией. В случае если контент размещён в открытом доступе, это не означает, что на него не распространяется авторское право. Парсинг может привести к нарушению авторских прав, если парсер собирает такой контент, который охраняется авторским правом и не распространяется на условиях открытой лицензии, разрешающей копирование.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПАРСЕРОВ

Существуют разные технические методы защиты от парсинга. Парсеры в своей работе часто используют механизмы, которые описаны в таблице. Помимо этого в таблице рассмотрены распространённые механизмы защиты от процесса парсинга. Для предотвращения одной атаки со стороны программного обеспечения парсера возможно применить несколько вариантов защиты, которые при комплексном воздействии на атаку позволяют дать удовлетворяющий результат для владельца информации при защите его сведений.

Таблица – Механизмы процесса парсинга и механизмы защиты от парсинга

Механизмы парсинга	Механизмы защиты от парсинга
Смена User Agent для создания иллюзии запросов от разных людей	Ограничение количества запросов за единицу времени от одного пользователя
Использование бот-сети	Блокировка IP-адресов или диапазона IP-адресов в том числе по странам
Кастомизированные скрипты	Внедрение Captcha Ограничение количества/скорости запросов с одного IP или в рамках одной сессии
Эмуляторы браузеров	Смена идентификаторов полей, изменение структуры страницы

В таблице указаны самые распространённые и наиболее часто используемые механизмы защиты от парсинга. Если указанные механизмы не справляются с атакой парсера и их методы не являются действенными, то есть возможность использовать специализированные системы защиты от атак ботов и парсеров. Специализированные системы защиты от атак ботов и парсеров комбинируют все существующие методы защиты информации владельца web-ресурса, используя при этом передовые способы и методы технологий защиты информации.

Из существующих специализированных систем защиты от атак ботов и парсеров можно выделить следующие механизмы:

– механизм «цифровой отпечаток устройства». При внедрении данного механизма происходит оценка пользовательской стороны клиента по определённым критериям, учитывая присвоение определителя пользователя с последующим анализом собранных сведений. Это позволяет создать категории пользователей и распознавать их, сопоставляя активность клиента в течение всего времени пользования контентом. Минусом данного способа внедрения механизма является анализ большого объёма полученных данных и использование их в результате противодействия атакам. Ещё одним минусом является обработка больших данных для обеспечения срабатывания защиты в режиме реального времени, учитывая минимальные задержки на обработку сведений. В результате механизм «цифровой отпечаток устройства» не предотвращает атаку и не является профилактикой для существующих угроз, но при этом позволяет реализовать достаточно сложный способ защиты от процесса парсинга;

– классификация трафика. При внедрении данного метода используются основы машинного обучения и статистические методы. Важно, что при использовании статистических функций будут определены закономерности в трафике и поведении пользователя;

– анализ поведения пользователей. При внедрении данной системы защиты от парсинга необходимо проводить анализ биометрических данных. К биометрическим данным относят: движения и положение устройств и их движения. Примером при использовании такого способа защиты от парсинга является мобильные SDK для анализа пользовательского поведения;

– базы репутации. Данным способом пользуются поставщики услуг в сфере информационных технологий, которые строят программные обеспечения и системы защиты от атак ботов, парсеров. Главное при использовании данного метода – это определение трафиков десятков/сотен тысяч наиболее популярных веб-сайтов и миллионов пользователей. Информацию можно переиспользовать, чтобы защитить веб-сайты от тех клиентов, которые уже совершали подозрительные или вредоносные действия на других веб-сайтах. В базах репутации содержатся данные как по IP-адресам, так и по конкретным клиентам на основе отпечатков клиентов.

НАВЯЗЫВАНИЕ КАК МЕТОД ЗАЩИТЫ ОТ ПАРСЕРОВ

В различных областях информационной безопасности активно используется метод, основанный на навязывании злоумышленнику ложной информации. В качестве примера можно привести использование муляжей видеокамер или объектов инфраструктуры.

Если проецировать данный подход к защите WEB-пространства от парсинга, то можно предложить метод навязывания заведомо ложной информации злоумышленнику, который заключается в следующем: WEB-ресурс выявляет роботизированный трафик и выводит изменённую версию страницы подозрительным пользователям.

Похожая стратегия используется в приложении «Авито»: в объявлении не указывается достоверный номер телефона продавца или покупателя, но при вызове осуществляется переадресация на правильный номер.

Предлагается расширить данный подход, который заключается в следующем:

- 1) распознать, что автоматизированный сбор совершают вредоносные парсеры;
- 2) сформировать «ложные» данные по запросу;
- 3) передать ложные данные по запросу.

При этом необходимо учесть, что вывод ложных данных не должен сказываться на внешнем виде страницы. Кроме того, желательно, чтобы страница модифицировалась таким образом, чтобы легальный пользователь все также смог бы наблюдать оригинальный контент.

Рассмотрим две ситуации, при которых происходит парсинг:

1. Злоумышленник использует поиск по сайту, и в результате ему предоставляется информация в виде списка.

Когда легальные пользователи проводят поиск, то выводимые результаты соответствуют требованиям поиска, а наиболее подходящая под критерии информация будет в первых строках. Если поиск проводит вредоносный парсер, то значения списка полученных результатов будут перемешаны и строки, полностью отвечающие заданным критериям, будут опущены вниз. При этом нельзя исключать возможность получения «ложного списка» легальным пользователем. В этом случае с помощью анализа верных результатов он легко сможет выбрать подходящие ему результаты поиска.

2. Злоумышленник перебирает WEB-страницы по имеющимся у него адресам, где целевой информацией для него является подробная характеристика об объектах: людях, товарах и т. д. Когда действия злоумышленника будут распознаны, в структуре HTML-страницы будет создано ещё одно поле, в которое будет помещена оригинальная информация. При этом ложная информация будет выведена в поле, предназначенное для оригинальных сведений.

На рисунке 2 представлен алгоритм анализа поведения пользователя.

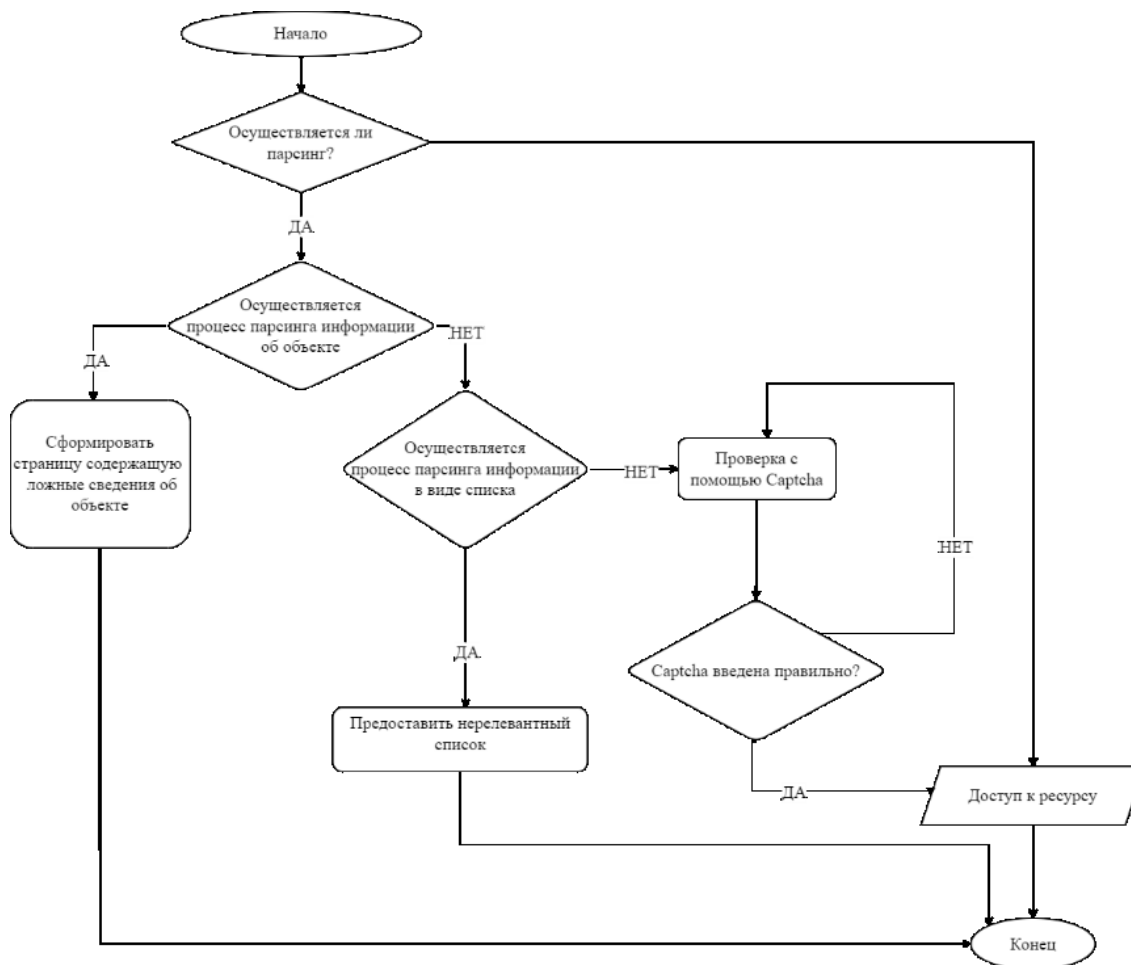


Рисунок 2 – Анализ поведения пользователя

Реализация данного метода позволит скомпрометировать собранный парсером пакет информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированный сбор потенциально полезной для злоумышленника информации – основное направление использования парсеров. Основными направлениями использования «плохих» ботов злоумышленником являются автоматизированные сборы персональных данных пользователей, информации об интеллектуальной собственности, финансово-значимого контента для распространения информации конкурентов.

На сегодняшний день воздействие «плохих» ботов на IT-пространство с каждым годом увеличивается, и вопрос о полноценной защите от механизмов парсинга «плохих» ботов остаётся открытым.

Существуют технические и юридические меры защиты информации, которые имеют ряд недостатков. Существующие технические меры защиты информации имеют свои недостатки. К сожалению, на сегодняшний день нет универсального метода, который однозначно обеспечит защиту от угроз парсинга.

В рамках статьи были рассмотрены механизмы парсинга и предложен усовершенствованный способ защиты от парсинга – навязывание злоумышленнику заведомо ложной информации. Опираясь на идею защиты противоправных действий злоумышленников с помощью установки муляжей видеокamer, предлагается алгоритм, который позволит защитить веб-контент от парсинга. Реализация данного метода позволит сделать собранные данные непригодными для последующего использования.

Список источников

1. Парсинг. Что это? – URL: <https://www.ipipe.ru/info/parsing.html>.
2. Как работают поисковые системы? – URL: https://gdetraffic.com/Analitika/rabota_poiskovika.
3. Исследования компании IMPERVA по статистике веб-трафика. – URL: <https://www.imperva.com/blog/the-economics-of-web-scraping-report/>.
4. Конституция Российской Федерации.
5. Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27.07.2006 № 149-ФЗ.

6. Уголовный кодекс РФ. Статья 272. Неправомерный доступ к компьютерной информации.
7. Демина, Р. Ю. Защита web-контента от нелегитимного роботизированного копирования / Р. Ю. Демина, И. М. Ажмухамедов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2022. – Т. 18, № 1 (27). – С. 3–4.
8. Дёмин, К. С. Обнаружение и противодействие вредоносным веб-роботам / К. С. Дёмин А. Н. Марьенков // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Астрахань, 2021. – С. 121–127.
9. Демина, Р. Ю. Защита web-контента от нелегитимного роботизированного копирования / Р. Ю. Демина, И. М. Ажмухамедов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2022. – Т. 18, № 1 (27). – С. 11–17.
10. Суханов, А. А. Анализ способов сбора социальных данных из сети интернет / А. А. Суханов, А. С. Маратканов. // International Scientific Review. – 2017. – Вып. 1. – С. 22–25.
11. Бирюков, В. А. Парсинг аудитории в социальных медиа как инструмент повышения доходов от рекламы электронных средств массовой информации / В. А. Бирюков, О. В. Дмитриева, М. В. Ливсон // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2021. – № 2. – С. 45–52.
12. Прокопенко, В. В. Парсинг как один из инструментов интеллектуальных баз данных / В. В. Прокопенко // Аллея науки. – 2020. – Т. 2, № 6 (45). – С. 68–75.
13. Дубровина, А. И. Парсинг, его последствия и методы предотвращения в целях защиты информации / А. И. Дубровина // Modern Science. – 2020. – № 12–3. – С. 230–233.
14. Ермоленко, А. В. О востребованности подготовки в области парсинга данных для web-разработчиков / А. В. Ермоленко, Н. О. Котелина, Е. Н. Старцева, М. Н. Юркина // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. – 2021. – № 1 (38) – С. 56–69.

References

1. *Parsing. Chto eto?* [Parsing. What's it?]. Available at: <https://www.ipipe.ru/info/parsing.html>.
2. *Kak rabotayut poiskovyie sistemy?* [How do search engines work?]. Available at: https://gdetraffic.com/Analitika/rabota_poiskovika.
3. *Issledovaniya kompanii IMPERVA po statistike veb-trafika* [Research by IMPERVA on web traffic statistics]. Available at: <https://www.imperva.com/blog/the-economics-of-web-scraping-report/>.
4. *Konstitutsiya Rossiyskoy Federatsii* [The Constitution of the Russian Federation].
5. *Federalnyy zakon «Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii»* [Federal Law “On Information, Information Technologies and Information Protection”] dated 27.07.2006 no. 149-FZ.
6. *Ugolovnyy kodeks RF. Statya 272. Nepravomernyy dostup k kompyuternoy informatsii* [Criminal Code of the Russian Federation Article 272. Unauthorized access to computer information].
7. Demina, R. Yu., Azhmukhamedov, I. M. Zashchita web-kontenta ot nelegitimnogo robotizirovannogo kopiroyaniya [Protection of web content from illegitimate robotic copying]. *Vestnik Groznenskogo gosudarstvennogo neftyanogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Grozny State Oil Technical University. Technical Sciences], 2022, vol. 18, no. 1 (27), pp. 3–4.
8. Demin, K. S., Marienkov, A. N. Obnaruzheniye i protivodeystviye vredonosnym veb-robotam [Detection and counteraction to malicious web robots]. *Problemy povysheniya effektivnosti nauchnoy raboty v oboronno-promyshlennom komplekse Rossii : materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of increasing the efficiency of scientific work in the military-industrial complex of Russia : materials of the IV All-Russian scientific and practical conference]. Astrakhan, 2021, pp. 121–127.
9. Demina, R. Yu., Azhmukhamedov, I. M. Zashchita web-kontenta ot nelegitimnogo robotizirovannogo kopiroyaniya [Protection of web content from illegitimate robotic copying]. *Vestnik Groznenskogo gosudarstvennogo neftyanogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Grozny State Oil Technical University. Technical Sciences], 2022, vol. 18, no. 1 (27), pp. 11–17.
10. Sukhanov, A. A., Maratkanov, A. S. Analiz sposobov sbora sotsialnykh dannykh iz seti internet [Analysis of methods of collecting social data from the Internet]. *International Scientific Review*, 2017, iss. 1, pp. 22–25.
11. Biryukov, V. A., Dmitrieva, O. V., Livson, M. V. Parsing auditorii v sotsialnykh media kak instrument povysheniya dokhodov ot reklamy elektronnykh sredstv massovoy informatsii [Audience parsing in social media as a tool to increase advertising revenue from electronic media]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela* [News of higher educational institutions. Problems of printing and publishing], 2021, no. 2, pp. 45–52.
12. Prokopenko, V. V. Parsing kak odin iz instrumentov intellektualnykh baz dannykh [Parsing as one of the tools of intelligent databases]. *Alleya nauki* [Alley of Science], 2020, vol. 2, no. 6 (45), pp. 68–75.
13. Dubrovina, A. I. Parsing, yego posledstviya i metody predotvrashcheniya v tselyakh zashchity informatsii [Parsing, its consequences and methods of prevention in order to protect information]. *Modern Science*, 2020, no. 12–3, pp. 230–233.
14. Ermolenko, A. V., Kotelina, N. O., Startseva, E. N., Yurkina, M. N. O vostrebovanosti podgotovki v oblasti parsinga dannykh dlya web-razrabotchikov [On the demand for training in the field of data parsing for web developers]. *Vestnik Syktyvskarskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Bulletin of Syktvykar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Computer science], 2021, no. 1 (38), pp. 56–69.

Статья поступила в редакцию 19.06.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 04.07.2023.

The article was submitted 19.06.2023; approved after reviewing 03.07.2023; accepted for publication 04.07.2023.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

DOI 10.54398/20741707_2023_3_133
УДК 616-71

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ НИСТАГМА

Непрокин Алексей Владимирович, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

аспирант, ORCID: 0000-0002-4729-0450, e-mail: alexhome16@mail.ru

Горбунов Алексей Викторович, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

доктор медицинских наук, доцент, ORCID: 0000-0002-6880-0472, e-mail: alexey.gorbunov@mail.ru

Палатов Павел Алексеевич, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

студент, ORCID: 0009-0000-8416-4376, e-mail: palatov.pavel01@gmail.com

В статье рассматриваются основные технические средства и методы, применяемые в процессе диагностики головокружений. Целью работы является разработка устройства для регистрации нистагма на основе доступных аппаратных средств, а также повышение информативности и удобства использования в процессе диагностики. Разграничение различных форм глазодвигательных нарушений представляет важную диагностическую задачу. Современные инструментальные методы исследования головокружений подразумевают, в первую очередь, анализ видеозаписей движений глаз. В статье показывается пример реализации платформы для видеонистагмографии, построенной на основе доступных аппаратных средств. Предложенные полезные модели целесообразно использовать в процессе диагностики вестибулярных нарушений, а также в исследовательских и образовательных целях. Применение предлагаемых технических средств для визуализации и анализа нистагма обеспечивает воспроизводимость и сопоставимость результатов при ведении пациентов с головокружениями и, как следствие, повышение точности медицинской диагностики с 61,5 до 100 %.

Ключевые слова: видеонистагмография, нистагм, очки Френзеля, шлем виртуальной реальности, головокружение, вестибулярные нарушения

NYSTAGMUS VISUALIZATION TECHNOLOGY

Neprokin Alexey V., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: 0000-0002-4729-0450, e-mail: alexhome16@mail.ru

Gorbunov Alexey V., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

Doct. Sci. (Medicine), ORCID: 0000-0002-6880-0472, e-mail: alexey.gorbunov@mail.ru

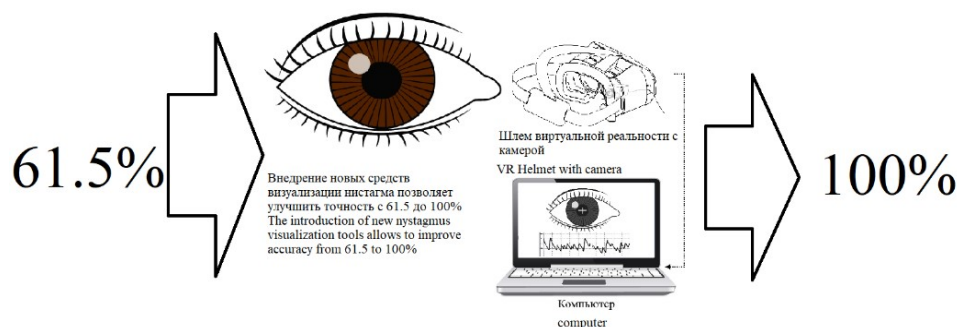
Palatov Pavel A., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

student, ORCID: 0009-0000-8416-4376, e-mail: palatov.pavel01@gmail.com

The paper represents the main technology and methods used in the process of vertigo diagnostics. The aim is to develop a device for recording nystagmus based on available hardware, as well as to improve the informativity and usability in the diagnostic process. Differentiation of various forms of oculomotor abnormalities is an important diagnostic task. Modern instrumental methods of dizziness examination suppose, primarily, the analysis of video recordings of eye movements. The article describes an example of implementation of a videonystagmography device based on the available hardware. It is reasonable to utilize the proposed models in the process of vestibular disorders diagnostics as well as for research and educational purposes. Application of the proposed technology for visualization and analysis of nystagmus provides reproducibility and comparability of results in the diagnosis of patients with vertigo and, as a result, increases the accuracy of medical diagnostics from 61,5 to 100 %.

Keywords: videonystagmography, nystagmus, Frenzel goggles, virtual reality headset, dizziness, vestibular disorders

Graphical annotation (Графическая аннотация)

**ВВЕДЕНИЕ**

Жалобы на головокружение широко распространены среди пациентов общемедицинской практики и занимают второе место (после головной боли) по числу обращений к врачу-неврологу [1]. При головокружениях, как правило, возникает нистагм – ритмичные движения глаз, анализ которых позволяет врачу определить состояние вестибулярной системы и уровень её поражения для выбора тактики ведения пациента. Нистагм может быть признаком патологии, наблюдаться у здоровых людей. Поэтому разграничение различных форм нистагма представляет важную диагностическую задачу [2–5].

В настоящей статье рассматриваются основные технические средства, используемые в процессе диагностики головокружений для визуализации нистагма. Применение современных технических средств визуализации и анализа нистагма нацелено на обеспечение воспроизводимости и сопоставимости результатов исследования и повышение точности медицинской диагностики головокружений [6–12].

Основными целями настоящего исследования явились разработка устройства для регистрации нистагма на основе доступных аппаратных средств, создание приспособленности к удобному его использованию и повышение точности диагностики нистагма.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Визуализация нистагма является одним из видов диагностического обследования, достаточно широко используемых в неврологической и оториноларингологической практиках [1–8, 12]. Наиболее распространёнными методами в клинической практике являются применение очков Френзеля, электронистагмография (ЭНГ) и видеонистагмография (ВНГ).

Простейшим приспособлением для исследования нистагма являются очки Френзеля, в которых применяются большой оптической силы линзы (+20 дптр), которые полностью размывают наблюдаемую пациентом окружающую обстановку [12]. Это создаёт препятствие для фиксации взгляда, которая способна подавить периферический нистагм. При этом глазные яблоки в таких линзах выглядят увеличенными, что позволяет врачу проводить наблюдение за движением глаз [5].

Основными недостатками при использовании данного метода является субъективность оценки глазо-двигательных нарушений, невозможность оценить изменения в динамике, особенно если между осмотрами прошло много времени.

Данный метод применяется только для качественной оценки движений глаз. В ряде случаев оценка нистагма с помощью очков Френзеля невозможна или затруднена (микродвижения, торсионный компонент нистагма).

Метод электронистагмографии, активно используемый в медицинских исследованиях прошлого века, применяется для количественной оценки движений глаз. Метод основан на фиксации изменения корнеоретинального потенциала с помощью электродов, фиксируемых в области глаз.

Недостатками метода является использование электродов и, как следствие, вызванные этим неудобства в процессе диагностики, наличие электрических шумов в записи и ограничение подвижности пациента. ЭНГ не позволяет регистрировать торсионные (вращательные) движения глаз, фиксировать движения глаза меньше чем в 2–3° по амплитуде, а также чувствительна к индивидуальным особенностям пациента [3, 5]. В последнее время, метод электронистагмографии вытесняется более совершенной видеонистагмографией [5].

Основным современным методом объективной диагностики движений глаз (нистагма) является видеонистагмография [2, 5]. Метод основан на видеорегистрации движений глазного яблока с последующим анализом полученных результатов. Системы ВНГ, как правило, представляют собой пластиковые очки-маску, внутри которой размещены миниатюрные видеокамеры с инфракрасной подсветкой (рис. 1). Такая конструкция обусловлена тем, что глаза человека во время исследования нистагма должны находиться в темноте, чтобы избежать фиксации взгляда на каком-либо объекте в поле зрения, так как это способно повлиять на качество диагностики.

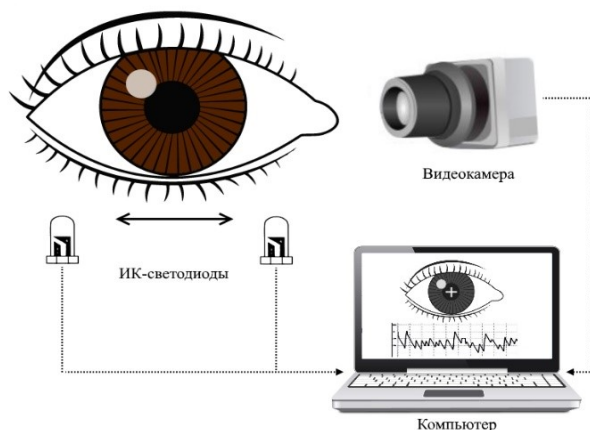


Рисунок 1 – Схематическое представление метода видеонистагмографии

Системы видеонистагмографии являются на сегодняшний день наиболее объективным методом количественной оценки движений глаз при различных неврологических заболеваниях, так как опирается на прямые данные о положении зрачков и скорости их перемещений и для большинства ВНГ тестов получаемые результаты достаточно стабильны во времени и от сессии к сессии [2, 4, 5, 9].

ВНГ исследование часто сопровождается проведением позиционных проб – оценкой движений глаз в различных положениях головы. Тщательный анализ движений глаз позволяет избежать ошибок при дифференциальной диагностике периферического и центрального нистагма.

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ НИСТАГМА

В России на сегодняшний день метод видеонистагмографии представлен далеко не так широко, как он того заслуживает [4], и практически не ведутся исследования, связанные с разработкой отечественных систем ВНГ. К сожалению, в век информационных технологий большинство врачей специалистов, прежде всего отоневрологов и отоларингологов, сталкиваясь с вестибулярной патологией в своей практике, по-прежнему вынуждены ограничиваться рутинным осмотром.

Современные подходы к исследованию глазодвигательных нарушений должны опираться, прежде всего, на анализ видеозаписей движений глаз [10, 11]. Актуальным остаётся вопрос технического решения систем диагностики вестибулярного аппарата, необходимость в современном и недорогом оборудовании [5].

Выбор аппаратной платформы для разрабатываемой системы обусловлен активным развитием технологий и появлением недорогих очков виртуальной реальности для смартфонов, которые могут быть использованы в качестве платформы для построения систем видеонистагмографии в исследовательских и образовательных целях (рис. 2). Такую конструкцию (видео-Френзель) можно использовать при выполнении вестибулометрических тестов, позиционных манёвров, удалённой диагностики и при регистрации нистагменной реакции с одного и обоих глаз [5, 6, 9].

Возможна установка в корпусе очков одной камеры или двух, причём межзрачковое расстояние легко адаптируется к конкретному пациенту с помощью регуляторов [5, 6, 9]. Возможно применение проводных или беспроводных видеокамер с ИК подсветкой. Корпус таких очков выполнен из непрозрачного пластика, что позволяет избежать фиксации взгляда пациента во время исследования. Внутри корпуса при необходимости можно установить лампочку или светодиод с переключателем для фиксации взгляда в темноте.

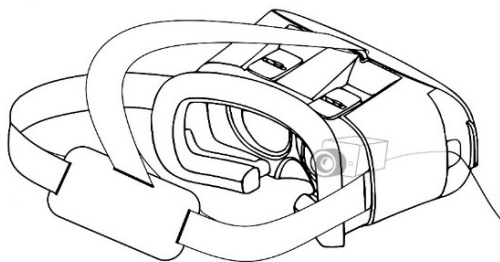


Рисунок 2 – Устройство для видеонистагмографии на основе шлема виртуальной реальности с установленной внутри видеокамерой

В исследуемой системе применяются ИК светодиоды 3014IRAB (Foryard Optoelectronics) с длиной волны 940 нм, установленные на модуле с сенсором OmniVision OV2710.

Видеозапись с частотой 30 кадров в секунду позволяет анализировать все типы нистагма [7]. Предложенная система может записывать видео с частотой до 120 кадров в секунду (при разрешении 640 на 480 пикселей) для более точного анализа быстрых движений глаз, таких как быстрая фаза нистагма. Применяемые в системе светодиоды ИК излучения соответствуют международному стандарту фотобиологической безопасности МЭК 62471:2006.

Для точной количественной оценки движений глаз необходимо проведение калибровки (установление соответствия между пройденным расстоянием в пикселях к углу, на который отклоняется взор) отдельно для каждого пациента и для каждого глаза из-за анатомических особенностей лица [2].

В существующих системах видеонистагмографии для проведения калибровки необходимо специальное оборудование со светодиодной индикацией или экран, на который проецируются визуальные указатели. Это создаёт дополнительные неудобства, поскольку возникает необходимость в покупке дополнительного оборудования, перепланировке кабинета диагностики.

Для решения задачи проведения калибровки было разработано устройство [8] для видеонистагмографии с возможностью калибровки движений глаз (рис. 3).

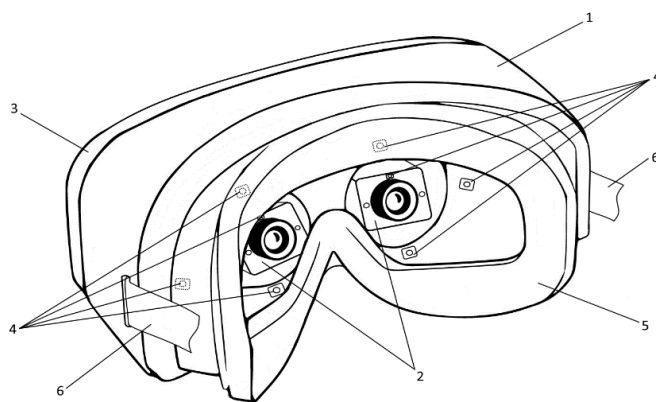


Рисунок 3 – Схема устройства с калибровочными светодиодами

Устройство состоит из корпуса (1), представляющего собой очки виртуальной реальности для смартфонов, в котором размещены: две видеокамеры с инфракрасной подсветкой (2), съёмная передняя непрозрачная крышка (3), система калибровочных меток в виде светодиодов видимого спектра (4), объектив (5), обеспечивающий плотное прилегание устройства к голове исследуемого, эластичные ремни (6) для фиксации устройства на голове пациента, отличающегося тем, что корпус представляет собой очки виртуальной реальности для смартфонов со съёмной передней непрозрачной крышкой и системой калибровочных меток в виде светодиодов видимого света для проведения процедуры калибровки движений глаз, а также для фиксации взгляда пациента во время исследования, при этом видеокамеры обеспечивают возможность регистрации и просмотра видео в реальном времени [8, 9].

В процессе калибровки светодиоды попеременно включаются, позволяя испытуемому зафиксировать на них взгляд сначала в горизонтальном направлении, а затем в вертикальном. Программное обеспечение в это время фиксирует крайние положения центра зрачка при фиксации взгляда и проводит необходимые расчёты.

Устройство позволяет проводить калибровку движений глаз, без необходимости использования дополнительного оборудования, за счёт того, что калибровочные метки (светодиоды) располагаются внутри его корпуса.

Таким образом, предложенное устройство для видеонистагмографии с возможностью калибровки движений глаз обеспечивает повышение информативности исследования и удобства в эксплуатации.

Повышение информативности диагностики головокружений с применением видеозаписей движений глаз обусловлено, в первую очередь, высокой чувствительностью метода, что подтверждается известными исследованиями [10, 11], а также нашими собственными наблюдениями. При сравнительном анализе группы пациентов (26 человек) с вестибулярным головокружением спонтанный нистагм выявлялся в 100 % случаев с применением метода видео-Френзеля, в то время как чувствительность метода с использованием традиционных очков Френзеля составила 61,5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены основные технические средства и методы визуализации нистагма. Современные, объективные методы диагностики вестибулярных нарушений должны быть основаны на видеорегистрации движений глаз. Разработанные устройства обеспечивают повышение информативности исследования и удобства в эксплуатации.

Предложенные полезные модели целесообразно использовать в процессе диагностики головокружений, а также в исследовательских и образовательных целях. Применение современных технических средств для визуализации и анализа нистагма обеспечивает качество медицинской диагностики пациентов с головокружениями.

Применение предлагаемых нами технических средств для визуализации и анализа нистагма обеспечивает воспроизводимость и сопоставимость результатов при ведении пациентов с головокружениями и, как следствие, повышение точности медицинской диагностики с 61,5 до 100 %.

Список источников

1. Dieterich, M. Neurological and somatoform vertigo syndromes / M. Dieterich, A. Eckhardt-Henn // *Nervenarzt*. – 2004. – № 75 (3). – С. 281–302.
2. Горбунов, А. В. Нистагмография в медико-биологической практике : учебное пособие / А. В. Горбунов, А. В. Непрокин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – 84 с.
3. Лихачев, С. А. Современные технологии диагностики вестибулярной дисфункции в неврологической практике / С. А. Лихачев, О. А. Аленикова // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. – 2011. – № 5 (2). – С. 34–39.
4. Белякова-Бодина, А. И. Видеонистагмография в диагностике глазодвигательных нарушений / А. И. Белякова-Бодина [и др.] // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. – 2017. – № 4. – С. 52–64.
5. Горбунов, А. В. Современные системы дифференциальной диагностики вестибулярных нарушений / А. В. Горбунов, А. В. Непрокин, Е. Н. Туголуков, В. С. Егоров // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 241–249.
6. Непрокин, А. В. Патент на полезную модель РФ № 183466 МПК А61В 3/113 (2006.01). Устройство для видеонистагмографии / А. В. Непрокин. – 2018. – Бюл. № 27.
7. Nystagmus. Simulating and Compensating for Eye Motion Blur with Eye Tribe (Stanford University). – 2015. – URL: http://stanford.edu/class/ee367/Winter2015/report_landry_lee_madduri.pdf (дата обращения: 14.05.2023).
8. Непрокин, А. В. Патент на полезную модель РФ № 211663 МПК А61В 3/113 (2006.01). Устройство для видеонистагмографии с возможностью калибровки движений глаз / А. В. Непрокин, А. В. Горбунов. – 2022. – Бюл. № 17.
9. Горбунов, А. В. Информационные технологии видеомониторинга нистагма / А. В. Горбунов, А. В. Непрокин // *Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы VI Международной научно-практической конференции*. – Тамбов, 2020. – Вып. 6, т. 2. – С. 86–90.
10. Baba, S. A comparative study on the observation of spontaneous nystagmus with Frenzel glasses and an infrared CCD camera / S. Baba et al. // *Journal of the Nippon Medical School*. – 2004. – Vol. 71. – P. 25–29.
11. West, P. D. Comparison of techniques for identification of peripheral vestibular nystagmus / P. D. West, Z. A. Sheppard, E. V. King // *The Journal of laryngology and otology*. – 2012. – Vol. 126 (12). – P. 1209–1215.
12. Пальчун, В. Т. Повышение эффективности диагностики нистагма при помощи модифицированных очков Френзеля / В. Т. Пальчун, А. И. Крюков, А. Л. Гусева, А. Л. Чернов // *Вестник оториноларингологии*. – 2016. – № 81 (6). – С. 78–81.

References

1. Dieterich, M., Eckhardt-Henn, A. Neurological and somatoform vertigo syndromes. *Nervenarzt*, 2004. no. 75 (3), pp. 281–302.
2. Gorbunov, A. V., Neprokin, A. V. *Nistagmografiya v mediko-biologicheskoy praktike : uchebnoe posobie* [Nystagmography in medical and biological practice : textbook]. Tambov, 2020. 84 p.
3. Likhachev, S. A., Alenikova, O. A. Sovremennye tekhnologii diagnostiki vestibulyarnoy disfunktsii v nevrologicheskoy praktike [Modern technologies for diagnosing vestibular dysfunction in neurological practice]. *Annaly klinicheskoy i eksperimentalnoy nevrologii* [Annals of Clinical and Experimental Neurology], 2011, no. 5 (2), pp. 34–39.
4. Belyakova-Bodina, A. I. [et al.] Videonistagmografiya v diagnostike glazodvigatelnykh narusheniy [Videonystagmography in the diagnosis of oculomotor disorders]. *Annaly klinicheskoy i eksperimentalnoy nevrologii* [Annals of Clinical and Experimental Neurology], 2017, no. 4, pp. 52–64.
5. Gorbunov, A. V., Neprokin, A. V., Tugolukov, E. N., Egorov, V. S. Sovremennye sistemy differentsialnoy diagnostiki vestibulyarnykh narusheniy [Modern systems for differential diagnosis of vestibular disorders]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University], 2019, vol. 25, no. 2, pp. 241–249.
6. Neprokin, A. V. *Patent na poleznuyu model RU № 183466 MPK A61B 3/113 (2006.01). Ustroystvo dlya videonistamografii* [Utility model patent of the Russian Federation no. 183466 IPC A61B 3/113 (2006.01). Device for videonistamography], 2018, bull. no. 27.
7. Nystagmus. Simulating and Compensating for Eye Motion Blur with Eye Tribe (Stanford University), 2015. URL: http://stanford.edu/class/ee367/Winter2015/report_landry_lee_madduri.pdf (accessed 14.05.2023).

8. Neprokin, A. V., Gorbunov, A. V. *Patent na poleznuyu model RU № 211663 MPK A61B 3/113 (2006.01). Ustroystvo dlja videonistagmografii s vozmozhnostyu kalibrovki dvizheniy glaz* [Utility model patent of the Russian Federation no. 211663 IPC A61B 3/113 (2006.01). Device for videonystagmography with the ability to calibrate eye movements], 2022, bull. no. 17.
9. Gorbunov, A. V., Neprokin, A. V. Informatsionnyye tekhnologii videomonitoringa nistagma [Information technology for nystagmus monitoring]. *Virtualnoe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyy dizayn : materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: materials VI International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2020, issue 6, vol. 2, pp. 86–90.
10. Baba, S. et al. A comparative study on the observation of spontaneous nystagmus with Frenzel glasses and an infrared CCD camera. *Journal of the Nippon Medical School*, 2004, vol. 71, pp. 25–29.
11. West, P. D., Sheppard, Z. A., King, E. V. Comparison of techniques for identification of peripheral vestibular nystagmus. *The Journal of laryngology and otology*, 2012, vol. 126 (12), pp. 1209–1215.
12. Palchun, V. T., Krukov, A. I., Guseva, A. L., Chernov, A. L. Povysheniye effektivnosti diagnostiki nistagma pri pomoshchi modifitsirovannykh ochkov Frenzelya [The enhanced efficiency of nystagmus detection using the modified Frenzel goggles with congenous illumination]. *Vestnik otorinolaringologii* [Bulletin of Otorhinolaryngology], 2016, no. 81 (6), pp. 78–81.

Статья поступила в редакцию 19.05.2023; одобрена после рецензирования 22.05.2023; принята к публикации 23.05.2023.

The article was submitted 19.05.2023; approved after reviewing 22.05.2023; accepted for publication 23.05.2023.

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) 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. 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 учётом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 12, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подрисовочных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 10 кегля. Альбомная ориентация страниц допускается только в порядке исключения для следующих случаев: широкоформатные таблицы с большим количеством колонок; иллюстрации большого размера, которые не уместаются на странице с книжной ориентацией.

Абзацные отступы одинаковы по всему тексту – 0,75 см. Кавычки («», «»), скобки ([], ()), маркеры и другие знаки должны быть аналогичными на протяжении всего предоставляемого для публикации материала.

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2023
№ 3 (63)**

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 15.12.2023 г.

Цена свободная
Уч.-изд. 12,3. Усл. печ. л. 17,2.
Заказ № 4553. Тираж 500 экз. (первый завод – 22 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