

ISSN 1816-0301 (Print)  
ISSN 2617-6963 (Online)

# ИНФОРМАТИКА

# INFORMATICS

TOM VOL. 20

3 | 2023

## ОТ РЕДАКЦИИ

В журнале «Информатика» публикуются оригинальные и обзорные статьи, описывающие результаты фундаментальных и прикладных исследований специалистов академического и вузовского профиля в области информатики и информационных технологий.

Основной целью журнала является публикация наиболее значимых новых результатов в указанной области. Приветствуются статьи, описывающие заключительные результаты научных проектов и диссертационных исследований, открывающие новые направления исследований, которые находятся на стыке информатики и других наук.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов в области информатики и информационных технологий.

### Основные разделы журнала:

- биоинформатика;
- математическое моделирование;
- защита информации и надежность систем;
- информационные технологии;
- логическое проектирование;
- обработка сигналов, изображений, речи, текста и распознавание образов;
- автоматизация проектирования;
- интеллектуальные системы.

**Префикс DOI:** 10.37661

### Условия распространения материалов:

контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

### Индексирование:

Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь журнал «Информатика» был включен в список научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований.

В декабре 2017 г. включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). С помощью инструментов и сервисов, доступных на платформе eLIBRARY (раздел «Личный кабинет»), можно самостоятельно корректировать список своих публикаций и цитирований в РИНЦ.

В июле 2017 г. включен в базу журналов открытого доступа Directory of Open Access Journals (DOAJ).

С помощью поисковых систем Google Scholar, WorldCat, Соционет можно получить свободный доступ к полному тексту научных публикаций журнала.

### Адрес редакции:

ул. Сурганова, 6, к. 305, г. Минск, 220012, Беларусь  
Тел. +375 (017) 351 26 22

### Editorial address:

Surganova str., 6, of. 305, Minsk, 220012, Belarus  
Phone +375 (017) 351 26 22

**E-mail:** rio@newman.bas-net.by

<https://inf.grid.by/jour>

## THE EDITOR'S NOTE

The journal "Informatics" is a scientific publication in computer sciences and information technologies which reviews the results in basic and applied research of scientists from the universities and scientific centers.

The journal focuses on the most significant and modern papers of research projects results and PhD/DSc thesis in computer sciences.

The journal is edited for the specialists in IT and computer sciences research and application.

### The main sections of the journal:

- bioinformatics;
- mathematical modeling;
- information protection and system reliability;
- information technology;
- logical design;
- signal, image, speech, text processing and pattern recognition;
- computer-aided design;
- artificial intelligence methods.

**DOI Prefix:** 10.37661

### Distribution:

content is distributed under Creative Commons Attribution 4.0 License

### Indexation:

the journal "Informatics" is in the list of scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus for scientists to publish the results of PhD/DSc research.

In December 2017 the journal was included in the database of the Russian Science Citation Index (RISC) and provides free access to reviewed electronic scientific paper, improving scientific information traffic and also raising quotation of works of the authors (please use <https://elibrary.ru> or section for authors [https://elibrary.ru\\_author\\_tools](https://elibrary.ru_author_tools)).

In July 2017 included in the database of open access journals Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Using the Google Scholar, WorldCat, Соционет search engine, you can get free access to full text of scientific publications of magazine.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

---

# ИНФОРМАТИКА

## Informatika

Том 20, № 3, июль-сентябрь 2023

---

---

*Ежеквартальный научный журнал*

*Издается с января 2004 г.*

Учредитель и издатель – государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» (ОИПИ НАН Беларуси)

Г л а в н ы й р е д а к т о р

**Тузиков Александр Васильевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси,  
ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

З а м е с т и т е л ь г л а в н о г о р е д а к т о р а

**Ковалев Михаил Яковлевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси,  
ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

**Абламейко Сергей Владимирович**, д-р техн. наук, проф., академик НАН Беларуси, БГУ (Минск, Беларусь)

**Анищенко Владимир Викторович**, канд. техн. наук, доцент, ООО «СофтКлуб» (Минск, Беларусь)

**Бибило Петр Николаевич**, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Бобов Михаил Никитич**, д-р техн. наук, проф., БГУИР (Минск, Беларусь)

**Долгий Александр Борисович**, д-р техн. наук, проф., Высшая инженерная школа Бретани (Нант, Франция)

**Дудин Александр Николаевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

**Карпов Алексей Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент, СПИИРАН (Санкт-Петербург, Россия)

**Килин Сергей Яковлевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., академик НАН Беларуси, Президиум НАН  
Беларуси (Минск, Беларусь)

**Краснопрошин Виктор Владимирович**, д-р техн. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

**Крот Александр Михайлович**, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Кругликов Сергей Владимирович**, д-р воен. наук, канд. техн. наук, доцент, ОИПИ НАН Беларуси  
(Минск, Беларусь)

**Лиходед Николай Александрович**, д-р физ.-мат. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

**Матус Петр Павлович**, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт математики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Скляр Валерий Анатольевич**, д-р техн. наук, проф., Университет Авейру (Авейру, Португалия)

**Сотсков Юрий Назарович**, д-р физ.-мат. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Стемпковский Александр Леонидович**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, ИПИМ РАН (Москва, Россия)

**Харин Юрий Семенович**, д-р физ.-мат. наук, проф., академик НАН Беларуси, НИИ ППМИ БГУ  
(Минск, Беларусь)

**Черемисинова Людмила Дмитриевна**, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

**Чернявский Александр Федорович**, д-р техн. наук, проф., академик НАН Беларуси, НИИ ПФП  
им. А. Н. Севченко БГУ (Минск, Беларусь)

**Ярмолик Вячеслав Николаевич**, д-р техн. наук, проф., БГУИР (Минск, Беларусь)

## Редакционный совет

**Ефанов Дмитрий Викторович**, Российский университет транспорта (Московский институт инженеров транспорта) (Москва, Россия)

**Кумари Мадху**, Университетский центр исследований и разработок, Университет Чандigarха (Мохали, Пенджаб, Индия)

**Лазарев Александр Алексеевич**, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

**Лай Цунг-Чьян**, Азиатский университет в Тайчжуне (Китайская Народная Республика, Тайвань)

**Марина Нинослав**, Университет информационных наук и технологий им. Св. апостола Павла (Охрид, Македония)

**Меликян Вазген Шаваршович**, Национальный политехнический университет Армении (Ереван, Армения)

**Пеш Эрвин**, Зигенский университет (Зиген, Германия)

**Сингх Таджиндер**, Институт инженерии и технологий Сант Лонговал (Лонговал, Пенджаб, Индия)

**Ходаченко Максим Леонидович**, Институт космических исследований Австрийской академии наук (Грац, Австрия)

**Чиулла Карло**, Университет Эпока (Тирана, Албания)

**Штейнберг Борис Яковлевич**, Институт математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия)

---

---

## ИНФОРМАТИКА

Том 20, № 3, июль-сентябрь 2023

---

---

Ответственный за выпуск *Мойсейчик Светлана Сергеевна*  
Редактор *Гончаренко Галина Борисовна*  
Компьютерная верстка *Бутевич Ольга Борисовна*

---

Сдано в набор 21.08.2023. Подписано в печать 18.09.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. 12,8. Уч.-изд. л. 12,5. Тираж 40 экз. Заказ 5.

---

Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/274 от 04.04.2014. ЛП № 02330/444 от 18.12.13. Ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Беларусь.

ISSN 1816-0301 (Print)  
ISSN 2617-6963 (Online)

THE UNITED INSTITUTE OF INFORMATICS PROBLEMS  
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

---

# INFORMATICS

Vol. 20, no. 3, Jule-September 2023

---

---

*Published quarterly*

*Issued since January 2004*

Founder and publisher – State Scientific Institution "The United Institute of Informatics  
Problems of the National Academy of Sciences of Belarus" (UIIP NASB)

Editor-in-Chief

**Alexander V. Tuzikov**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Corr. Member of NASB,  
UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Deputy Editor-in-Chief

**Mikhail Y. Kovalyov**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Corr. Member of NASB,  
UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Editorial Board

**Sergey V. Ablameyko**, D. Sc. (Eng.), Prof., Academician of NASB, BSU (Minsk, Belarus)

**Uladimir V. Anishchanka**, Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof., SoftClub Ltd. (Minsk, Belarus)

**Petr N. Bibilo**, D. Sc. (Eng.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

**Mikhail N. Bobov**, D. Sc. (Eng.), Prof., BSUIR (Minsk, Belarus)

**Alexandre B. Dolgui**, D. Sc. (Eng.), Prof., IMT Atlantique (Nantes, France)

**Alexander N. Dudin**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

**Alexey A. Karpov**, D. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., SPII RAS (Saint Petersburg, Russia)

**Sergey Ya. Kilin**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Academician of NASB, Presidium of NASB (Minsk, Belarus)

**Viktor V. Krasnoproshin**, D. Sc. (Eng.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

**Alexander M. Krot**, D. Sc. (Eng.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

**Sergey V. Kruglikov**, D. Sc. (Milit.), Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

**Nikolai A. Likhoded**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

**Petr P. Matus**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Mathematics of NASB (Minsk, Belarus)

**Valery A. Sklyarov**, D. Sc. (Eng.), Prof., University of Aveiro (Aveiro, Portugal)

**Yuri N. Sotskov**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

**Alexander L. Stempkovsky**, D. Sc. (Eng.), Prof., Academician of RAS, IPPM RAS (Moscow, Russia)

**Yuriy S. Kharin**, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Academician of NASB, RI APMI BSU (Minsk, Belarus)

**Ljudmila D. Cheremisinova**, D. Sc. (Eng.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

**Alexander F. Cherniavsky**, D. Sc. (Eng.), Prof., Academician of NASB, A. N. Sevchenko IAPP BSU (Minsk, Belarus)

**Vyacheslav N. Yarmolik**, D. Sc. (Eng.), Prof., BSUIR (Minsk, Belarus)

## Editorial Council

**Dmitry V. Efanov**, Russian University of Transport (Moscow Institute of Transport Engineers) (Moscow, Russia)

**Madhu Kumari**, University Center for Research & Development, Chandigarh University (Mohali, Punjab, India)

**Alexander A. Lazarev**, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS (Moscow, Russia)

**Tsung-Chyan Lai**, Asia University at Taichung (The People's Republic of China, Taiwan)

**Ninoslav Marina**, St. Paul the Apostle University of Information Sciences and Technology (Ohrid, Macedonia)

**Vazgen Sh. Melikyan**, National Polytechnic University of Armenia (Yerevan, Armenia)

**Erwin Pesch**, University of Siegen (Siegen, Germany)

**Tajinder Singh**, Sant Longowal Institute of Engineering & Technology (Longowal, Punjab, India)

**Maxim L. Khodachenko**, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences (Graz, Austria)

**Carlo Ciulla**, Epoka University (Tirana, Albania)

**Boris Steinberg**, Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

---

---

## INFORMATICS

Vol. 20, no. 3, July-September 2023

---

---

Issue Head *Sviatlana S. Maiseichyk*

Editor *Halina B. Hancharenka*

Computer Imposition *Volha B. Butsevich*

---

---

Sent for press 21.08.2023. Output 18.09.2023. Format 60×84 1/8. Offset paper. Headset Times. Riesography. Printed sheets 12,8. Publisher's signatures 12,5. Circulation 40 copies. Order 5.

---

---

State Scientific Institution "The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus".

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions no. 1/274 dated 04.04.2014. License for the press no. 02330/444 dated 18.12.13.

6, Surganov Str., 220012, Minsk, Belarus.

ISSN 1816-0301 (Print)  
ISSN 2617-6963 (Online)

## СОДЕРЖАНИЕ

### *БИОИНФОРМАТИКА*

**Карпенко А. Д., Войтко Т. Д., Тузиков А. В., Андрианов А. М.** Генеративная нейронная сеть на основе модели гетероэнкодера для de novo дизайна потенциальных противоопухолевых препаратов: применение к Vcr-Abl тирозинкиназе..... 7

### *КОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГЕОИНФОРМАТИКА*

**Каплярчук Е. А., Козлов С. В., Савиных И. Э., Шапкин А. С.** Обработка ретранслированных навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS в задаче оценивания полного электронного содержания в ионосфере..... 21

### *ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ*

**Сорокина В. В.** Распознавание состава ткани предметов одежды на изображении в сфере электронной коммерции с использованием нейронных сетей..... 37

### *МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ*

**Клименок В. И.** Характеристики производительности системы массового обслуживания с расщеплением запросов..... 50

**Шушкевич Г. Ч.** Моделирование электростатического поля заряженного кольца, расположенного внутри бесконечного цилиндра в присутствии тора ..... 61

### *ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ*

**Садовский М. Е.** Семантические модели и средства проектирования адаптивных пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем ..... 74

**Ковалёв М. В.** Семантические модели и средства разработки искусственных нейронных сетей и их интеграции с базами знаний ..... 90

**Вишняков В. А., Ся Ивэй.** Распознавание признаков болезни Паркинсона на основе анализа голосовых маркеров и двигательной активности..... 106

ISSN 1816-0301 (Print)  
ISSN 2617-6963 (Online)

## CONTENTS

### *BIOINFORMATICS*

**Karpenko A. D., Vaitko T. D., Tuzikov A. V., Andrianov A. M.** A generative neural network based on a hetero-encoder model for de novo design of potential anticancer drugs: application to Bcr-Abl tyrosine kinase ..... 7

### *SPACE INFORMATION TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATICS*

**Kapliarchuk Y. A., Kozlov S. V., Savinykh I. E., Shapkin A. S.** Processing of retransmitted GPS signals in the problem of measuring the total electron content in the ionosphere ..... 21

### *SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION*

**Sorokina V. V.** Recognition of fabric composition of clothing in an image in e-commerce using neural networks ..... 37

### *MATHEMATICAL MODELING*

**Klimenok V. I.** Performance characteristics of the fork-join queuing system ..... 50

**Shushkevich G. Ch.** Modeling the electrostatic field of a charged ring located inside an infinite cylinder in the presence of a torus ..... 61

### *INTELLIGENT SYSTEMS*

**Sadouski M. E.** Semantic models and tools for designing adaptive user interfaces of intelligent systems ..... 74

**Kovalev M. V.** Semantic models and tools for the development of artificial neural networks and their integration into knowledge bases ..... 90

**Vishniakou U. A., Xia Yiwei.** Recognition of signs of Parkinson's disease based on the analysis of voice markers and motor activity ..... 106

# БИОИНФОРМАТИКА

## BIOINFORMATICS



УДК 004.94+547.7+616-006+616-085  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-7-20>

Оригинальная статья  
Original Paper

## Генеративная нейронная сеть на основе модели гетероэнкодера для de novo дизайна потенциальных противоопухолевых препаратов: применение к Vcr-Abl тирозинкиназе

А. Д. Карпенко<sup>1</sup>, Т. Д. Войтко<sup>2</sup>, А. В. Тузиков<sup>1</sup>, А. М. Андрианов<sup>3✉</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

<sup>3</sup>Институт биоорганической химии  
Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Купревича, 5/2, Минск, 220084, Беларусь

✉E-mail: alexande.andriano@yandex.ru

### Аннотация

**Цели.** Решается задача разработки генеративной модели гетероэнкодера для компьютерного дизайна потенциальных ингибиторов Vcr-Abl тирозинкиназы – фермента, активность которого является патофизиологической причиной хронического миелоидного лейкоза.

**Методы.** На основе рекуррентных и полносвязных нейронных сетей прямого распространения создана генеративная модель гетероэнкодера. Проведены обучение и тестирование этой модели на наборе химических соединений, которые содержат 2-ариламинопиримид, присутствующий в качестве основного фармакофора в структурах многих низкомолекулярных ингибиторов протеинкиназ.

**Результаты.** Разработанная нейронная сеть апробирована в процессе генерации широкого набора новых молекул и последующего анализа их химического сродства к Vcr-Abl тирозинкиназе методами молекулярного докинга.

**Заключение.** Показано, что разработанная нейронная сеть представляет собой перспективную математическую модель для de novo дизайна малых молекул, которые потенциально активны против Vcr-Abl тирозинкиназы и могут быть использованы для разработки эффективных противоопухолевых препаратов широкого спектра действия.

**Ключевые слова:** методы машинного обучения, глубокое обучение, генеративные нейронные сети, гетероэнкодеры, Vcr-Abl тирозинкиназа, молекулярный докинг, противоопухолевые препараты, хронический миелоидный лейкоз

Для цитирования. Генеративная нейронная сеть на основе модели гетероэнкодера для de novo дизайна потенциальных противоопухолевых препаратов: применение к Bcr-Abl тирозинкиназе / А. Д. Карпенко [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 7–20. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-7-20>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 30.05.2023

Подписана в печать | Accepted 28.07.2023

Опубликована | Published 29.09.2023

## A generative neural network based on a hetero-encoder model for de novo design of potential anticancer drugs: application to Bcr-Abl tyrosine kinase

Anna D. Karpenko<sup>1</sup>, Timofey D. Vaitko<sup>2</sup>, Alexander V. Tuzikov<sup>1</sup>, Alexander M. Andrianov<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup>The United Institute of Informatics Problems  
of the National Academy of Sciences of Belarus,  
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University,  
av. Nezavisimosti, 4, Minsk, 220030, Belarus

<sup>3</sup>Institute of Bioorganic Chemistry  
of the National Academy of Sciences of Belarus,  
st. Kuprevicha, 5/2, Minsk, 220084, Belarus

✉E-mail: [alexande.andriano@yandex.ru](mailto:alexande.andriano@yandex.ru)

### Abstract

**Objectives.** The problem of developing a generative hetero-encoder model for computer-aided design of potential inhibitors of Bcr-Abl tyrosine kinase, an enzyme whose activity is the pathophysiological cause of chronic myeloid leukemia, is being solved.

**Methods.** A generative hetero-encoder model was designed based on the recurrent and fully connected neural networks of direct propagation. Training and testing of this model were carried out on a set of chemical compounds containing 2-arylamino-pyrimidine, which is present as the main pharmacophore in the structures of many small-molecule inhibitors of protein kinases.

**Results.** The developed neural network was tested in the process of generating a wide range of new molecules and subsequent analysis of their chemical affinity for Bcr-Abl tyrosine kinase using molecular docking methods.

**Conclusion.** It is shown that the developed neural network is a promising mathematical model for de novo design of small molecules which are potentially active against Bcr-Abl tyrosine kinase and can be used to develop effective broad-spectrum anticancer drugs.

**Keywords:** machine learning methods, deep learning, generative neural networks, hetero-encoders, Bcr-Abl tyrosine kinase, molecular docking, anticancer drugs, chronic myeloid leukemia

**For citation.** Karpenko A. D., Vaitko T. D., Tuzikov A. V., Andrianov A. M. *A generative neural network based on a hetero-encoder model for de novo design of potential anticancer drugs: application to Bcr-Abl tyrosine kinase*. Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 7–20 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-7-20>

**Conflict of interest.** The authors declare of no conflict of interest.

**Введение.** В настоящее время методы машинного обучения получили существенное развитие и используются для решения многих задач, связанных с разными областями науки и техники. Применение этих методов в био- и хемоинформатике, а также в медицинской химии позво-

лило ускорить процесс создания новых лекарственных препаратов и повысить эффективность программ фармацевтических исследований [1, 2]. Современные алгоритмы машинного обучения используются для прогнозирования фармакологических свойств малых молекул, получения информации о молекулярных механизмах белок-белковых и белок-лигандных взаимодействий, исследования количественных зависимостей «структура – активность» и «структура – свойство», предсказания структуры белков и аффинности связывания лигандов с молекулярной мишенью и виртуального скрининга потенциальных лекарств [1, 2]. Среди самых ярких достижений технологий искусственного интеллекта необходимо выделить разработанную британской компанией Google DeepMind глубокую нейронную сеть AlphaFold 2 [3, 4], в основе которой лежит новый подход к машинному обучению, использующий физические и биологические данные о структуре белков и информацию о множественном выравнивании их аминокислотных последовательностей. С помощью этой программы оказалось возможным предсказывать на атомном уровне трехмерные структуры белков по их первичной структуре. Данные о структурах белков депонируются в базе данных белков AlphaFold, которая включает на сегодняшний день более 2 млн белковых структур (URL: <https://alphafold.ebi.ac.uk>) [5]. Использование предсказательных моделей нейронных сетей для скрининга баз данных химических соединений позволило идентифицировать ряд антибактериальных и противовирусных средств, в том числе ингибиторов ВИЧ-1 и SARS-CoV-2 [6–8]. Эти модели были также успешно применены для скрининга одобренных Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США лекарственных препаратов, направленного на их перепрофилирование для терапии COVID-19 [8] и лекарственно устойчивых форм туберкулеза [9]. В частности, авторы работы [9] использовали нейронную сеть глубокого обучения для виртуального скрининга ряда библиотек лекарственных соединений и обнаружили молекулу галицина, которая структурно отличается от обычных антибиотиков и проявляет бактерицидную активность против широкого филогенетического спектра патогенов, включая *Mycobacterium tuberculosis* и резистентные к карбапенемам энтеробактерии. Результаты работы [9] наглядно продемонстрировали эффективность применения методов глубокого обучения для прогнозирования потенциальных лекарств и, в частности, для расширения набора структурно различных антибактериальных средств.

Разработка эффективных алгоритмов глубокого обучения дала толчок к развитию нового направления исследований, ориентированного на *de novo* дизайн молекул с заданными фармакологическими свойствами и синтетической доступностью [10–15]. На сегодняшний день предложено большое число генеративных моделей глубокого обучения, которые продемонстрировали перспективность их использования для генерации новых молекул-кандидатов в лекарственные средства [10–15]. В качестве успешных применений генеративных нейронных сетей следует отметить разработку ингибитора янус-киназы 3 и активных *in vivo* ингибиторов рецепторов доменов дискоидина 1 и 2 [15]. Однако очевидно, что, несмотря на значительный прогресс в развитии алгоритмов глубокого обучения, их потенциал в области фармацевтических исследований в полной мере еще не раскрыт. Поэтому создание генеративных моделей глубокого обучения с различными видами архитектур и типами входных данных и разными методами обучения имеет большое научное и практическое значение.

Настоящее исследование посвящено разработке генеративной нейронной сети глубокого обучения для *de novo* дизайна потенциальных ингибиторов Bcr-Abl тирозинкиназы – фермента, играющего ключевую роль в патогенезе хронического миелоидного лейкоза (ХМЛ), характеризующегося неконтролируемым ростом миелоидных клеток в периферической крови и костном мозге [16].

В клинической практике для терапии ХМЛ используются несколько ингибиторов Bcr-Abl тирозинкиназы прямого взаимодействия с АТФ-связывающим карманом фермента, среди которых в первую очередь следует отметить такие препараты, как иматиниб, нилотиниб, понатиниб, дазатиниб и бозутиниб [17–20]. Однако все эти соединения проявляют высокую токсичность, вызывающую ряд гематологических и негематологических побочных эффектов [21]. Кроме того, у большинства пациентов после длительной химиотерапии возникает резистентность

к применяемым препаратам [21]. В связи с этим актуальным является поиск новых ингибиторов Vcr-Abl тирозинкиназы, обладающих меньшей токсичностью и снижающих риск возможного возникновения резистентности к используемым препаратам, связанной с их длительным применением.

Цель настоящего исследования заключалась в разработке генеративной нейронной сети глубокого обучения на основе модели гетероэнкодера для конструирования новых потенциальных ингибиторов Vcr-Abl тирозинкиназы и ее мутантной формы Vcr-Abl(T315I), резистентной к ряду противоопухолевых препаратов, используемых для лечения пациентов с ХМЛ [22–24]. Для достижения этой цели были проведены исследования, которые включали следующие этапы:

- разработку архитектуры гетероэнкодера – усовершенствованной версии автоэнкодера, способной одновременно обрабатывать входные данные о молекуле в нескольких разных форматах с целью получения более стабильных и экономичных в поддержке генеративных моделей, применимых для химических соединений различных классов и дающих улучшенные по сравнению с автоэнкодерами результаты;
- формирование обучающей библиотеки малых молекул, содержащих 2-ариламинопиридин – фрагмент, присутствующий в качестве основного фармакофора в структурах многих низкомолекулярных ингибиторов протеинкиназ [22];
- обучение и тестирование нейронной сети на наборе соединений из сформированной молекулярной библиотеки;
- оценку результатов работы гетероэнкодера;
- генерацию с помощью разработанной нейронной сети набора малых молекул с заданной энергией связывания с терапевтической мишенью;
- построение методами молекулярного докинга комплексов сгенерированных гетероэнкодером соединений с Vcr-Abl тирозинкиназой и ее мутантной формой Vcr-Abl(T315I) и предсказание их потенциальной ингибиторной активности с помощью оценочных функций AutoDock Vina [25], NNScore 2.0 [26] и RF-Score 4 [27];
- анализ результатов молекулярного докинга и отбор соединений-лидеров, перспективных для разработки новых ингибиторов Vcr-Abl тирозинкиназы.

**Архитектура модели гетероэнкодера.** Разработанная нейронная сеть основана на архитектуре гетероэнкодера, представляющего собой автоэнкодер, предназначенный для решения задач, в которых входные данные представлены в нескольких разных форматах [28–30]. Такая архитектура нейронной сети позволяет получить более информативное латентное пространство за счет большего числа начальных признаков, что расширяет возможности поиска зависимостей между ними в процессе обучения гетероэнкодера [28]. В настоящем исследовании реализована модель гетероэнкодера с тремя энкодерами и двумя декодерами, которая использует открытую библиотеку Keras (URL: <https://keras.io>), обеспечивающую работу с искусственными нейронными сетями (рис. 1). В этой модели входные данные задаются в строковых форматах SMILES (Simplified Molecular Input Line Entry System) и канонический SMILES [31–33], а также числовым вектором характеристики молекулы (URL: <https://www.rdkit.org/docs/source/rdkit.Chem.Descriptors.htm>) (рис. 1).

С учетом специфики входных данных были разработаны две подмодели: в качестве энкодеров для строковых форматов SMILES и канонический SMILES была выбрана архитектура с двумя слоями LSTM (Long Short-Term Memory). Входные данные обрабатываются двумя слоями LSTM, состоящими из 128 ячеек каждый, и полученные эмбединги для строкового формата передаются на полносвязный слой (dense encoder) нейронной сети (рис. 1).

Числовые характеристики молекул обрабатываются полносвязной нейронной сетью прямого распространения, которая представлена энкодером, состоящим из двух полносвязных слоев с размерностью 64 и 32, слоя батч-нормализации и дополнительного полносвязного слоя из 16 нейронов, результаты работы которого являются эмбедингами для числовых признаков. Эти эмбединги попадают на конкатенирующий слой, где образуют один вектор, который нормализуется на слое батч-нормализации и передается на полносвязный слой из 128 нейронов,

после чего задается желаемое значение энергии связывания молекулы с терапевтической мишенью. Результаты работы этого слоя, т. е. обработанные эмбединги и величина энергии связывания, образуют латентное пространство размерностью 129 (рис. 1).

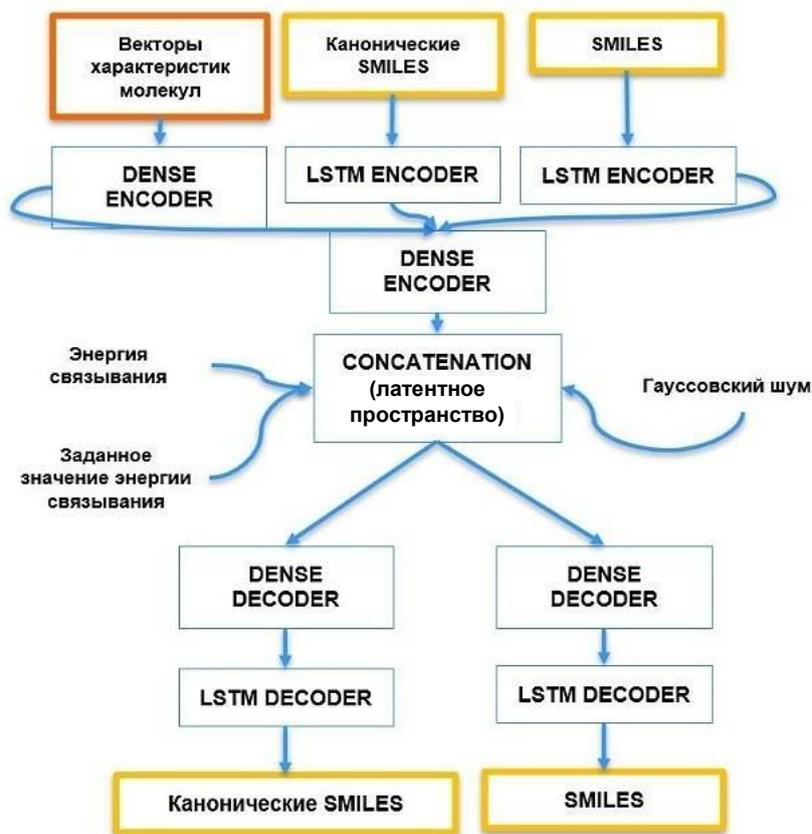


Рис. 1. Архитектура разработанной модели гетероэнкодера

Fig. 1. Architecture of the developed hetero-encoder model

В разработанную модель гетероэнкодера включены два одинаковых декодера (рис. 1), предназначенные для того, чтобы получить из векторов латентного пространства описание молекулы в двух строковых форматах. Декодеры функционируют следующим образом: вектор латентного пространства подается на два независимых полносвязных слоя размерностью 128 каждый и после их прохождения нормализуется на слоях батч-нормализации. На выходе генерируются два числовых вектора, которые передаются в качестве инициализирующих векторов на слой LSTM. На вход этого слоя дополнительно поступает строковый формат (для каждого слоя свой). Размерность слоя LSTM в декодерах также равна 128. После прохождения слоя LSTM данные передаются на полносвязный слой с функцией активации softmax, которая обрабатывает их таким образом, чтобы получить на выходе вероятности следующих символов. Для всех остальных полносвязных слоев используется функция активации ReLu, а для слоев LSTM – функция Tanh.

Разработанная модель гетероэнкодера имеет следующие особенности:

- во время подготовки входных данных в начало и конец строки добавляются символы для обучения слоев LSTM, поэтому на вход гетероэнкодера подается строка без последнего символа, а на выходе ожидается строка без первого символа;

- на латентный слой добавлен нейрон, позволяющий использовать в качестве дополнительного параметра свободную энергию связывания; этот нейрон не связан с энкодерами и используется только в декодерах для генерации молекул с желаемым химическим средством к терапевтической мишени;

- для более эффективного и стабильного обучения нейронной сети в ее кодирующей и декодирующей части используются слои батч-нормализации;
- на этапах кодирования и декодирования форматы данных не связаны друг с другом, что позволяет расширять архитектуру сети в случае необходимости ее перепрофилирования на другие терапевтические мишени;
- все энкодеры и декодеры обучаются вместе и одновременно в общей структуре гетероэнкодера.

**Подготовка входных данных.** Для формирования обучающей молекулярной библиотеки из базы данных PubChem (URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>) [34] были отобраны 120 000 соединений, содержащих ариламинопиримидин. Химические структуры этих соединений преобразовывали в форматы SMILES и канонический SMILES. Формат SMILES дает информацию о составе и химической структуре молекулы с использованием строки символов ASCII, а канонический SMILES представляет собой версию спецификации SMILES, включающую правила канонизации, которые позволяют записать формулу молекулы любого вещества однозначным образом. Эти правила касаются выбора первого атома в записи, направления обхода молекулярных циклов и выбора направления основной цепи молекулы при разветвлениях.

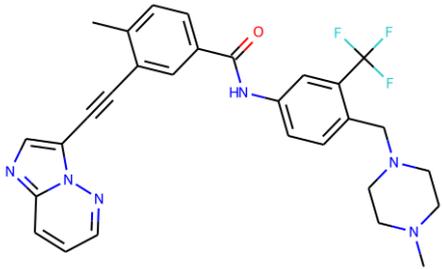
В табл. 1 дан пример описания химической структуры молекулы в форматах SMILES и канонический SMILES.

Таблица 1

Представление химической структуры молекулы в форматах SMILES и канонический SMILES

Table 1

Presentation of chemical molecular structure in SMILES and canonical SMILES formats

Химическая структура <i>Chemical structure</i>	
Химическая формула <i>Chemical formula</i>	C <sub>29</sub> H <sub>27</sub> F <sub>3</sub> N <sub>6</sub> O
Формат SMILES <i>SMILES format</i>	<chem>Cc1ccc(cc1C#Cc2cnc3n2cccc3)C(=O)Nc4ccc(c(c4)C(F)(F)F)CN5CCN(CC5)C</chem>
Канонический SMILES <i>Canonical SMILES</i>	<chem>Cc1ccc(C(=O)Nc2ccc(CN3CCN(C)CC3)c(C(F)(F)F)c2)cc1C#Cc1cnc2ccnnc12</chem>

Полученные молекулярные дескрипторы интегрировали в обучающую выборку, а затем преобразовали и отфильтровали с помощью процедуры, описанной ниже. Для каждой молекулы проверяли длины строковых форматов, и в тех случаях, когда они располагались вне диапазона 35–75 символов, молекулу удаляли из набора данных. Далее все атомы в строковой записи меняли на их односимвольные эквиваленты для предотвращения дополнительных трудностей при работе нейронной сети. Затем первые символы строк заменяли новым символом открытия строки, который до этого не встречался в выборке, и всем строкам дописывали символы завершения, причем таким образом, чтобы все строки после преобразования имели одинаковую длину. После этого строки преобразовывали в векторный формат. Сначала для каждого строкового формата извлекали уникальные символы и каждому из них присваивали уникальный индекс в рамках формата данных. После этого каждый символ строки заменяли числовым вектором с размерностью, равной числу уникальных символов в формате. Числовой вектор состоит из нулей и единственной единицы на месте индекса символа, т. е. каждая строка была представлена в виде матрицы, состоящей из нулей и единиц (этот метод также известен как One-Hot-

Encoding, URL: <https://machinelearningmastery.com/why-one-hot-encode-data-in-machine-learning/>). В случае числовых эмбеддингов применяли процедуру стандартизации с целью уравновесить их влияние в процессе обучения. Таким образом, после фильтрации была получена выборка из 108 410 молекул в форматах, выбранных для обучения нейронной сети. Затем методом молекулярного докинга (программа AutoDock Vina, URL: <https://vina.scripps.edu>) [25] генерировали комплексы этих молекул со структурой Vcr-Abl тирозинкиназы в кристалле (URL: <https://www.rcsb.org>, PDB ID: 3OXZ) [35] и рассчитывали значения свободной энергии связывания. Молекулярный докинг проводили в приближении жесткого рецептора и гибких лигандов. Ячейка для докинга включала АТФ-связывающий сайт Vcr-Abl тирозинкиназы и имела следующие параметры:  $\Delta X = 31 \text{ \AA}$ ,  $\Delta Y = 23 \text{ \AA}$ ,  $\Delta Z = 23 \text{ \AA}$  с центром в точках  $X = 18 \text{ \AA}$ ,  $Y = 8 \text{ \AA}$ ,  $Z = 6 \text{ \AA}$ . Значение параметра, характеризующего полноту поиска, задавали равным 100 [25]. Подготовленная обучающая библиотека объемом в 108 410 соединений и соответствующие им значения свободной энергии связывания сформировали набор данных для обучения и тестирования нейронной сети, который был разделен на тренировочный и тестовый поднаборы в пропорции 80 и 20 % соответственно от общего числа соединений.

**Обучение гетерознкодера.** Модель гетерознкодера включала 784 537 параметров (весов), из которых 781 369 параметров использовали для ее обучения. В процессе обучения применяли функцию потерь  $LF$  (Loss Function) следующего вида:

$$LF(s) = CCE(s) + 0,1 \cdot CCL(s),$$

где  $CCE(s)$  – категориальная кросс-энтропия [35],  $s$  – молекула в формате SMILES, а  $CCL(s)$  (CustomChemLoss) – функция, налагающая штрафы за нарушения стереохимии молекулы и отсутствие в ее структуре 2-ариламинопиримидина. Значение весового множителя штрафной функции выбирали путем перебора дискретного числа коэффициентов, направленного на определение такой величины этого параметра, при которой достигалась устойчивость обучения нейронной сети.

Категориальную кросс-энтропию  $CCE(s)$  вычисляли по формуле

$$CCE(s) = - \sum_{s_i \in S} p(s_i) \log q(s_i),$$

где  $p(s_i)$  и  $q(s_i)$  – соответственно истинная и предсказанная вероятности генерации символа  $s_i$  строки  $s$ .

Штрафную функцию  $CCL(s)$  рассчитывали с помощью следующих критериев:

$$CCL(s) = \begin{cases} 0, & \text{если строка } s \text{ корректна и содержит 2-ариламинопирамидин;} \\ 1, & \text{если строка } s \text{ корректна, но не содержит 2-ариламинопирамидин;} \\ 5, & \text{если строка } s \text{ некорректна.} \end{cases}$$

В процессе обучения функция потерь для тренировочного набора изменялась в пределах от 1,867 до 1,0375, а для тестового набора – от 1,943 до 1,0445.

В качестве оптимизатора применяли метод стохастической оптимизации Адам [36]. Для обучения гетерознкодера использовали следующие параметры:

- коэффициент сохранения первого момента  $\beta_1 = 0,9$ ;
- коэффициент сохранения второго момента  $\beta_2 = 0,999$ ;
- сглаживающий параметр  $\zeta = 10^{-7}$ ;
- объект, содержащий информацию о вычислительном узле  $\eta = 0,005$ ;
- начальное значение скорости обучения 0,005;
- количество полных итераций обучения сети 25;
- размер подвыборки на одном шаге обучения 256.

Графики функции потерь для тренировочного и тестового наборов данных (рис. 2) свидетельствуют об их подобию и конечной сходимости, что позволяет сделать вывод об успешном обучении нейронной сети и отсутствии ее переобучения.

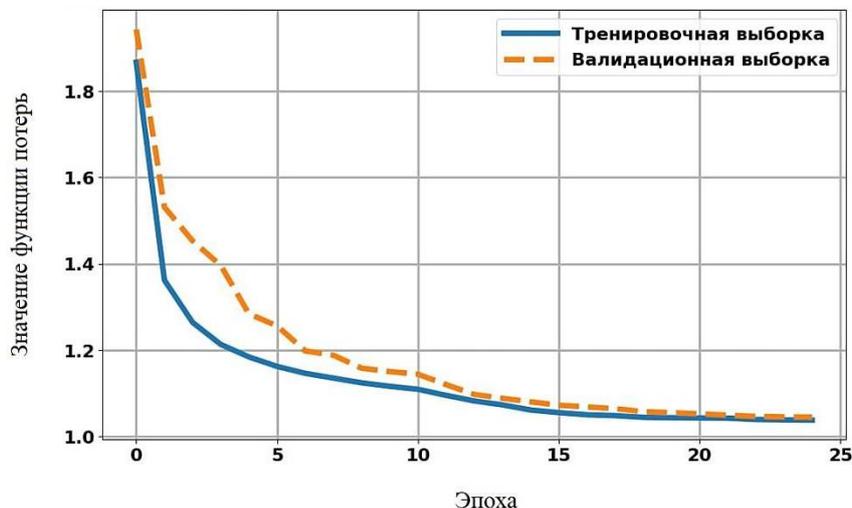


Рис. 2. Потери при обучении и валидации для разработанной модели гетероэнкодера

Fig. 2. Training and validation losses for the developed hetero-encoder model

**Генерация соединений.** Разработанную модель гетероэнкодера использовали для генерации широкого набора высокоаффинных лигандов Vcr-Abl тирозинкиназы с целью последующей идентификации потенциальных ингибиторов этого фермента методами молекулярного докинга. Для реализации процесса генерации с помощью кодирующей части модели получали представление латентного пространства из молекул обучающей библиотеки с энергией связывания ниже  $-9$  ккал/моль. Далее в полученные векторы вносили некоторый стандартно распределенный шум для генерации новых латентных векторов, которые вместе с заданным значением энергии связывания подавались на декодирующую часть модели в качестве инициализирующих векторов, а стартовым символом для посимвольной генерации каждый раз являлся символ начала строки, добавленный ранее. Символы генерировались последовательно до получения символа окончания строки. В результате работы гетероэнкодера были получены линейные представления SMILES для 1117 молекул, которые очищали от дубликатов, проверяли на корректность, интерпретируемость и содержание 2-ариламинопиримидина с помощью модуля RDKit [37] и преобразовывали из формата SMILES в химические структуры. После процедуры фильтрации молекул были отобраны 1083 соединения, потенциальную ингибиторную активность которых против Vcr-Abl тирозинкиназы оценивали методом молекулярного докинга.

**Оценка результатов работы гетероэнкодера.** Для оценки эффективности работы гетероэнкодера с помощью программы AutoDock Vina (URL: <https://vina.scripps.edu>) были построены комплексы сгенерированных нейронной сетью соединений с рентгеновскими структурами Vcr-Abl тирозинкиназы (PDB ID: 3OXZ; URL: <https://www.rcsb.org>) и ее мутантной формы Vcr-Abl(T315I) (PDB ID: 3OY3; URL: <https://www.rcsb.org>) [35]. Молекулярный докинг выполняли по вычислительному протоколу, идентичному тому, который был использован при формировании обучающего набора данных. Согласно расчетным данным сгенерированные соединения имеют значения энергии связывания с нативной и мутантной Vcr-Abl тирозинкиназой, варьирующие в интервале от  $-6,5$  до  $-13,8$  ккал/моль (рис. 3).

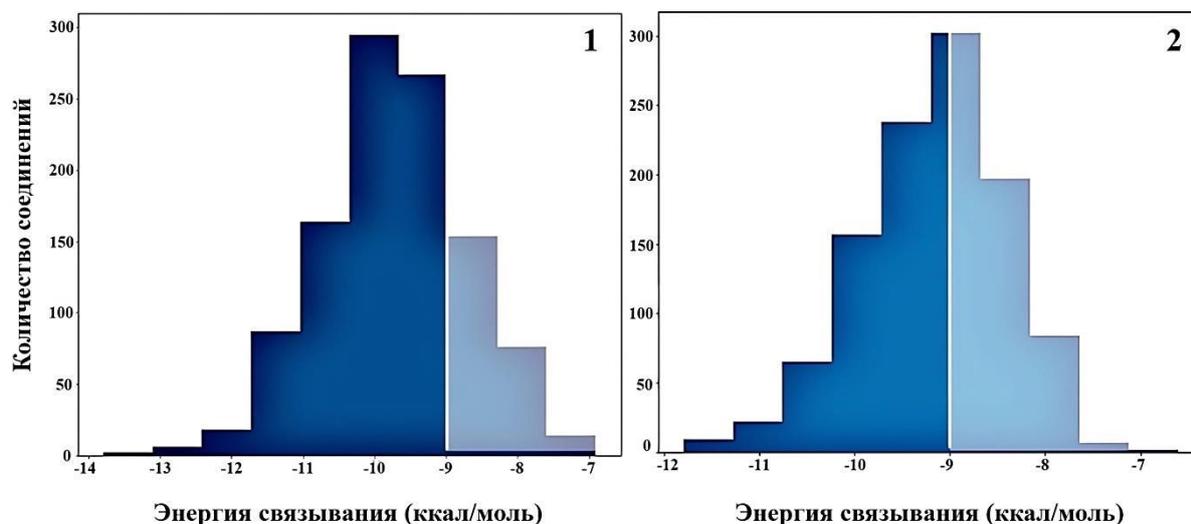


Рис. 3. Распределение энергии связывания сгенерированных соединений с нативной (1) и мутантной (Т315I) (2) тирозинкиназой

Fig. 3. Binding energy distribution of generated compounds with the native (1) and mutant (T315I) (2) tyrosine kinase

Для дальнейшего анализа были отобраны 569 молекул с энергией связывания от  $-9,0$  до  $-13,8$  ккал/моль, для которых проводили более точную оценку химического сродства к Bcr-Abl и Bcr-Abl(T315I) тирозинкиназе с помощью оценочных функций AutoDock Vina, NNScore 2.0 [26] и RF-Score-4 [27]. С этой целью для всех соединений определяли их ранги согласно каждой оценочной функции и на основе полученных данных вычисляли величину экспоненциального консенсусного ранга (exponential consensus rank,  $ECR$ ) по формуле [38]

$$ECR = \sum_{sf} \frac{1}{\sigma_{sf}} \cdot \exp\left(-\frac{rank_{sf}}{\sigma_{sf}}\right),$$

где  $rank_{sf}$  – ранг соединения согласно оценочной функции  $sf$ ;  $\sigma_{sf}$  – параметр, контролирующий влияние оценочной функции  $sf$  на результаты консенсусного отбора (при расчетах  $ECR$  для всех рассматриваемых оценочных функций значение  $\sigma_{sf}$  задавали равным 10, предполагая, что их вклады в суммарную величину  $ECR$  одинаковы).

С целью идентификации соединений, потенциально активных против обеих терапевтических мишеней, для всех отобранных молекул рассчитывали перекрестный экспоненциальный консенсусный ранг ( $crossECR$ ) по формуле

$$crossECR(i) = \frac{ECR_1(i)}{\max_i\{ECR_1(i)\}} + \frac{ECR_2(i)}{\max_i\{ECR_2(i)\}},$$

где  $ECR_1(i)$  – значение  $ECR$  лиганда  $i$  для первой мишени (Bcr-Abl тирозинкиназы), а  $ECR_2(i)$  – значение  $ECR$  лиганда  $i$  для второй мишени (Bcr-Abl(T315I) тирозинкиназы). Молекулы, имевшие наиболее низкие значения  $crossECR$ , относили к группе перспективных кандидатов на роль мультитаргетных противоопухолевых соединений, способных блокировать АТФ-связывающие сайты как Bcr-Abl тирозинкиназы, так и ее мутантной формы Bcr-Abl(T315I).

Анализ расчетных данных позволил идентифицировать четыре соединения-лидера, которые проявили высокое химическое сродство к нативной и мутантной (Т315I) тирозинкиназам. Химические структуры этих соединений показаны на рис. 4, а в табл. 2 приведены их физико-химические параметры, традиционно используемые в качестве основных фильтров для скрининга молекул на их способность быть эффективными при пероральном применении. Из данных табл. 2 следует, что соединения III и IV полностью удовлетворяют правилу пяти Липин-

ского, которое налагает ограничения на такие важные для потенциального лекарства характеристики, как всасывание, распределение, метаболизм и экскреция [39]. В то же время молекулы I и II обнаруживают лишь одно нарушение этого правила, связанное с небольшим превышением их молекулярной массы (табл. 2). Это позволяет предположить, что данные соединения также обладают лекарственными свойствами [39]. Идентифицированные соединения характеризуются низкими значениями свободной энергии связывания, предсказанными для комплексов лиганд/Bcr-Abl с помощью оценочных функций AutoDock Vina, NNScore 2.0 и RF-Score-4 (табл. 3). С учетом стандартной ошибки методов молекулярного докинга, составляющей ~ 2,9 ккал/моль [25], эти значения сопоставимы с величинами, рассчитанными для мощного противоопухолевого препарата понатиниба [18], использованного в качестве позитивного контроля (табл. 3).

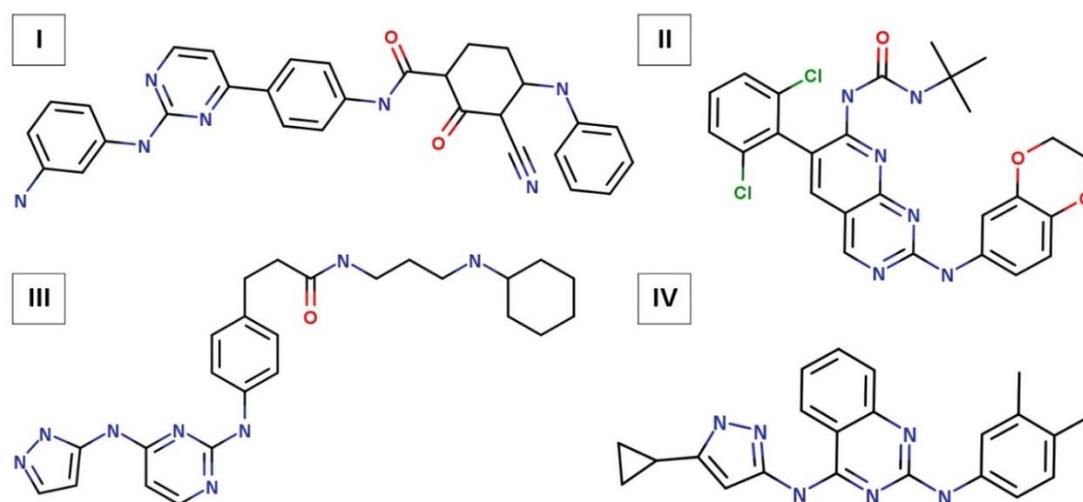


Рис. 4. Химические структуры идентифицированных соединений

Fig. 4. Chemical structures of identified compounds

Таблица 2

Физико-химические параметры идентифицированных соединений – потенциальных ингибиторов Bcr-Abl тирозинкиназы и ее мутантной формы Bcr-Abl(T315I)

Table 2

Physicochemical parameters of identified compounds, potential inhibitors of Bcr-Abl tyrosine kinase and its mutant form Bcr-Abl(T315I)

Соединение <i>Compound</i>	Химическая формула <i>Chemical formula</i>	Молекулярная масса (Да) <i>Molecular mass (Da)</i>	LogP	Число доноров водородной связи <i>Number of H-bond donors</i>	Число акцепторов водородной связи <i>Number of H-bond acceptors</i>
I	C <sub>30</sub> H <sub>27</sub> N <sub>7</sub> O <sub>2</sub>	517,58	3,28	4	5
II	C <sub>26</sub> H <sub>24</sub> C <sub>12</sub> N <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	539,41	4,79	3	6
III	C <sub>25</sub> H <sub>34</sub> N <sub>8</sub> O	462,59	3,31	5	5
IV	C <sub>22</sub> H <sub>22</sub> N <sub>6</sub>	370,45	4,31	3	3

Примечание: приведенные данные получены с помощью веб-сервера SwissADME (URL: <http://www.swissadme.ch>), LogP – липофильность соединения.

Note: the given data were obtained using the SwissADME web server (URL: <http://www.swissadme.ch>), LogP – lipophilicity of the compound.

Таблица 3

Значения crossECR и энергии связывания (ккал/моль) для четырех сгенерированных нейронной сетью соединений I-IV и понатиниба (V) в комплексах с Bcr-Abl тирозинкиназой и ее мутантной формой Bcr-Abl(T315I)

Table 3

CrossECR values and binding energies (kcal/mol) for four neural network-generated compounds I–IV and ponatinib (V) in the complexes with Bcr-Abl tyrosine kinase and its mutant form Bcr-Abl(T315I)

Соединение <i>Compound</i>	Значение crossECR <i>CrossECR</i> value	Энергия связывания <i>Binding energy</i>					
		Bcr-Abl тирозинкиназы <i>Bcr-Abl tyrosine kinase</i>			Bcr-Abl(T315I) тирозинкиназы <i>Bcr-Abl(T315I) tyrosine kinase</i>		
		AutoDock Vina	RF-Score-4	NNScore 2.0	AutoDock Vina	RF-Score-4	NNScore 2.0
I	0,0674	-13,8	-11,5	-9,8	-11,3	-11,3	-8,9
II	0,0674	-13,0	-11,6	-10,1	-11,0	-11,5	-9,0
III	0,0835	-10,4	-11,6	-11,7	-10,0	-11,3	-11,3
IV	0,0931	-13,4	-11,3	-9,3	-11,4	-11,4	-5,8
V	0,0399	-12,0	-11,4	-12,2	-12,2	-11,2	-12,4

Полученные результаты показывают, что разработанная нейронная сеть представляет собой перспективную математическую модель для *de novo* дизайна малых молекул, которые потенциально активны против Bcr-Abl тирозинкиназы и ее мутантной формы Bcr-Abl(T315I) и могут быть использованы для разработки эффективных противоопухолевых препаратов широкого спектра действия.

Расчеты проводились с помощью вычислительной системы, имеющей следующие характеристики: Intel(R) Xeon(R) Platinum 8259CL CPU @ 2.50GHz x2, 12 GB RAM, GPU NVIDIA T4 16GB Memory, 2560 Cores, 160 TMUS.

**Заключение.** На основе рекуррентных и полносвязных нейронных сетей прямого распространения разработана модель гетероэнкодера для генерации новых потенциальных ингибиторов Bcr-Abl тирозинкиназы – фермента, играющего важную роль в развитии ХМЛ. Проведены обучение и тестирование нейронной сети, выполнен анализ результатов ее работы. В процессе апробации нейронной сети сгенерированы 1083 молекулы, химическое сродство которых к активным центрам нативной и мутантной (T315I) тирозинкиназ исследовано методом молекулярного докинга. В результате анализа полученных данных идентифицированы четыре соединения-лидера, представляющие значительный интерес для проведения дальнейших экспериментальных и теоретических исследований, включающих химический синтез молекул, биомедицинские испытания *in vitro* и оптимизацию их структур методами QSAR [40, 41], направленную на получение аналогов с улучшенной противоопухолевой активностью и приемлемыми фармакологическими свойствами.

Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Конвергенция 2025» (подпрограмма «Междисциплинарные исследования и новые технологии»), задание 3.04.1).

**Вклад авторов.** А. Д. Карпенко и Т. Д. Войтко разработали и реализовали архитектуру генеративной модели гетероэнкодера, обучили, протестировали и апробировали нейронную сеть. А. Д. Карпенко провела молекулярный докинг сгенерированных гетероэнкодером соединений с Bcr-Abl тирозинкиназой. А. М. Андрианов и А. В. Тузиков осуществляли руководство проектом и написали рукопись. Все авторы анализировали данные расчетов, обсуждали полученные результаты и внесли свой вклад в окончательную версию статьи.

## References

1. Vamathevan J., Clark D., Czodrowski P., Dunham I., Ferran E., ..., Zhao S. Applications of machine learning in drug discovery and development. *Nature Reviews. Drug Discovery*, 2019, vol. 18, no. 6, pp. 463–477. <https://doi.org/10.1038/s41573-019-0024-5>
2. Lipinski C. F., Maltarollo V. G., Oliveira P. R., da Silva A. B. F., Honorio K. M. Advances and perspectives in applying deep learning for drug design and discovery. *Frontiers in Robotics and AI*, 2019, vol. 6, art. 108. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2019.00108/full> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00108>
3. Cramer P. AlphaFold2 and the future of structural biology. *Nature Structural & Molecular Biology*, 2021, vol. 28, no. 9, pp. 704–705.
4. Bryant P., Pozzati G., Elofsson A. Improved prediction of protein-protein interactions using AlphaFold2. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, no. 1, art. 1265. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-29480-5> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29480-5>
5. David A., Islam S., Tankhilevich E., Sternberg M. J. The AlphaFold database of protein structures: a biologist's guide. *Journal of Molecular Biology*, 2022, vol. 434, no. 2, p. 167336.
6. Timmons P. B., Hewage C. M. ENNAVIA is a novel method which employs neural networks for antiviral and anti-coronavirus activity prediction for therapeutic peptides. *Briefings in Bioinformatics*, 2021, vol. 22, iss. 6, art. bbab258. Available at: <https://academic.oup.com/bib/article/22/6/bbab258/6326528> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.1093/bib/bbab258>
7. Andrianov A. M., Nikolaev G. I., Shuldov N. A., Bosko I. P., Anischenko A. I., Tuzikov A. V. Application of deep learning and molecular modeling to identify small drug-like compounds as potential HIV-1 entry inhibitors. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2022, vol. 40, no. 16, pp. 7555–7573. <https://doi.org/10.1080/07391102.2021.1905559>
8. Zhang Y., Ye T., Xi H., Juhas M., Li J. Deep learning driven drug discovery: Tackling Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2. *Frontiers in Microbiology*, 2021, vol. 12. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.739684/full> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.739684>
9. Stokes J. M., Yang K., Swanson K., Jin W., Cubillos-Ruiz A., ..., Collins J. J. A deep learning approach to antibiotic discovery. *Cell*, 2020, vol. 180, no. 4, art. e13, pp. 688–702. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.01.021>
10. Mercado R., Rastemo T., Lindelöf E., Klambauer G., Engkvist O., ..., Bjerrum E. J. Practical notes on building molecular graph generative models. *ChemRxiv*, 2020. Available at: <https://chemrxiv.org/engage/chemrxiv/article-details/60c74f55567dfe705bec5672> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.26434/chemrxiv.12888383>
11. Arús-Pous J., Blaschke T., Ulander S., Reymond J. L., Chen H., Engkvist O. Exploring the GDB-13 chemical space using deep generative models. *Journal of Cheminformatics*, 2019, vol. 11, art. 20. Available at: <https://jcheminf.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13321-019-0341-z> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.1186/s13321-019-0341-z>
12. Prykhodko O., Johansson S. V., Kotsias P. C., Arús-Pous J., Bjerrum E. J., ..., Chen H. A de novo molecular generation method using latent vector based generative adversarial network. *Journal of Cheminformatics*, 2019, vol. 11, no 1, art. 74. Available at: <https://jcheminf.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13321-019-0397-9> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.1186/s13321-019-0397-9>
13. Polykovskiy D., Zhebrak A., Vetrov D., Ivanenkov Y., Aladinskiy V., ..., Kadurin A. Entangled conditional adversarial autoencoder for de novo drug discovery. *Molecular Pharmaceutics*, 2018, vol. 15, no. 10, pp. 4398–4405. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.8b00839s>
14. Zhang J., Mercado R., Engkvist O., Chen H. Comparative study of deep generative models on chemical space coverage. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2021, vol. 61, no. 6, pp. 2572–2581. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv.13234289.v1>
15. Zhavoronkov A., Ivanenkov Y. A., Aliper A., Veselov M. S., Aladinskiy V. A., ..., Aspuru-Guzik A. Deep learning enables rapid identification of potent DDR1 kinase inhibitors. *Nature Biotechnology*, 2019, vol. 37, no. 9, pp. 1038–1040. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0224-x>
16. Köstler W. J., Zielinski C. C. Targeting receptor tyrosine kinases in cancer. *Receptor Tyrosine Kinases: Structure, Functions and Role in Human Disease*. New York, Springer, 2015, pp. 225–278.
17. Kantarjian H. M., Hochhaus A., Saglio G., De Souza C., Flinn I. W., ..., Hughes T. P. Nilotinib versus imatinib for the treatment of patients with newly diagnosed chronic phase, Philadelphia chromosome-positive, chronic myeloid leukaemia: 24-month minimum follow-up of the phase 3 randomised ENESTnd trial. *The Lancet Oncology*, 2011, vol. 12, no. 9, pp. 841–851. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(11\)70201-7](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(11)70201-7)

18. Tan F. H., Putoczki T. L., Stylli S. S., Luwor R. B. Ponatinib: a novel multi-tyrosine kinase inhibitor against human malignancies. *OncoTargets and Therapy*, 2019, vol. 12, pp. 635–645. <https://doi.org/10.2147/OTT.S189391>
19. O'Hare T. A decade of nilotinib and dasatinib: From in vitro studies to first-line tyrosine kinase inhibitors. *Cancer Research*, 2016, vol. 76, no. 20, pp. 5911–5913. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-16-2483>
20. Brümmendorf T. H., Cortes J. E., de Souza C. A., Guilhot F., Duvillié L., ..., Gambacorti-Passerini C. Bosutinib versus imatinib in newly diagnosed chronic-phase chronic myeloid leukaemia: Results from the 24-month follow-up of the BELA trial. *British Journal of Haematology*, 2015, vol. 168, no. 1, pp. 69–81. <https://doi.org/10.1111/bjh.13108>
21. Bhullar K. S., Lagarón N. O., McGowan E. M., Parmar I., Jha A., ..., Rupasinghe H. P. V. Kinase-targeted cancer therapies: progress, challenges and future directions. *Molecular Cancer*, 2018, vol. 17, art. 48. Available at: <https://molecular-cancer.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12943-018-0804-2> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.1186/s12943-018-0804-2>
22. Koroleva E. V., Ignatovich Zh. I., Sinyutich Yu. V., Gusak K. N. Aminopyrimidine derivatives as protein kinases inhibitors. Molecular design, synthesis, and biologic activity. *Russian Journal of Organic Chemistry*, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 139–177. <https://doi.org/10.1134/S1070428016020019>
23. Patel A. B., O'Hare T., Deininger M. W. Mechanisms of resistance to ABL kinase inhibition in CML and the development of next generation ABL kinase inhibitors. *Hematology/Oncology Clinics of North America*, 2017, vol. 31, no. 4, pp. 589–612. <https://doi.org/10.1016/j.hoc.2017.04.007>
24. Liu J., Zhang Y., Huang H., Lei X., Tang G., ..., Peng J. Recent advances in Bcr-Abl tyrosine kinase inhibitors for overriding T315I mutation. *Chemical Biology and Drug Design*, 2021, vol. 97, no. 3, pp. 649–664. <https://doi.org/10.1111/cbdd.13801>
25. Trott O., Olson A. J. AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 2010, vol. 31, no. 2, pp. 455–461. <https://doi.org/10.1002/jcc.21334>
26. Durrant J. D., McCammon J. A. NNScore 2.0: A neural-network receptor-ligand scoring function. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2011, vol. 51, no. 11, pp. 2897–2903. <https://doi.org/10.1021/ci2003889>
27. Wójcikowski M., Ballester P. J., Siedlecki P. Performance of machine-learning scoring functions in structure-based virtual screening. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 1–10.
28. Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 2006, vol. 313, no. 5786, pp. 504–507.
29. Hwang M., Qian Y., Wu C., Jiang W. C., Wang D., ..., Hwang K. S. A local region proposals approach to instance segmentation for intestinal polyp detection. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2023, vol. 14, no. 5, pp. 1591–1603.
30. Huang A., Ju X., Lyons J., Murnane D., Pettee M., Reed L. *Heterogeneous Graph Neural Network for Identifying Hadronically Decayed Tau Leptons at the High Luminosity LHC*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2301.00501.pdf> (accessed 07.08.2023).
31. Weininger D. SMILES, a chemical language and information system. 1. Introduction to methodology and encoding rules. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 1988, vol. 28, no. 1, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1021/ci00057a005>
32. Weininger D., Weininger A., Weininger, J. L. SMILES. 2. Algorithm for generation of unique SMILES notation. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 1989, vol. 29, no. 2, pp. 97–101.
33. O'Boyle N. M. Towards a Universal SMILES representation-A standard method to generate canonical SMILES based on the InChI. *Journal of Cheminformatics*, 2012, vol. 4, art. 22, pp. 1–14.
34. Kim S., Chen J., Cheng T., Gindulyte A., He J., ..., Bolton E. E. PubChem 2019 update: improved access to chemical data. *Nuclear Acids Research*, 2019, vol. 47(D1), pp. D1102–D1109.
35. Ho Y., Wookey S. The real-world-weight cross-entropy loss function: Modeling the costs of mislabeling. *IEEE Access*, 2019, vol. 8, pp. 4806–4813.
36. Kingma D. P., Ba J. *Adam: A Method for Stochastic Optimization*, 2014. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf> (accessed 07.08.2023).
37. Landrum G. *RDKit: A Software Suite for Cheminformatics, Computational Chemistry, and Predictive Modeling*, 2013. Available at: [https://www.rdkit.org/RDKit\\_Overview.pdf](https://www.rdkit.org/RDKit_Overview.pdf) (accessed 07.08.2023).

38. Palacio-Rodríguez K., Lans I., Cavasotto C. N., Cossio P. Exponential consensus ranking improves the outcome in docking and receptor ensemble docking. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, art. 5142. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-41594-3> (accessed 07.08.2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41594-3>

39. Lipinski C. A. Lead-and drug-like compounds: the rule-of-five revolution. *Drug Discovery Today: Technologies*, 2004, vol. 1, no. 4, pp. 337–341.

40. Verma J., Khedkar V. M., Coutinho E. C. 3D-QSAR in drug design-a review. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 95–115. <https://doi.org/10.2174/156802610790232260>

41. Kuseva C., Schultz T. W., Yordanova D., Tankova K., Kutsarova S., ..., Mekenyan O. G. The implementation of RAAF in the OECD QSAR Toolbox. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2019, vol. 105, pp. 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.03.018>

### Информация об авторах

*Карпенко Анна Дмитриевна*, научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.  
E-mail: [rfe.karpenko@gmail.com](mailto:rfe.karpenko@gmail.com)

*Войтко Тимофей Дмитриевич*, студент, Белорусский государственный университет.  
E-mail: [timvaitko@gmail.com](mailto:timvaitko@gmail.com)

*Тузиков Александр Васильевич*, член-корреспондент, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией математической кибернетики, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.  
E-mail: [tuzikov@newman.bas-net.by](mailto:tuzikov@newman.bas-net.by)

*Андрианов Александр Михайлович*, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси.  
E-mail: [alexande.andriano@yandex.ru](mailto:alexande.andriano@yandex.ru)

### Information about the authors

*Anna D. Karpenko*, Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.  
E-mail: [rfe.karpenko@gmail.com](mailto:rfe.karpenko@gmail.com)

*Timofey D. Vaitko*, Student, Belarusian State University.  
E-mail: [timvaitko@gmail.com](mailto:timvaitko@gmail.com)

*Alexander V. Tuzikov*, Corresponding Member, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Laboratory of Mathematical Cybernetics, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.  
E-mail: [tuzikov@newman.bas-net.by](mailto:tuzikov@newman.bas-net.by)

*Alexander M. Andrianov*, D. Sc. (Chem.), Prof., Chief Researcher, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus.  
E-mail: [alexande.andriano@yandex.ru](mailto:alexande.andriano@yandex.ru)

# КОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГЕОИНФОРМАТИКА

## SPACE INFORMATION TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATICS



УДК 550.388.2

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36>

Оригинальная статья  
Original Paper

### Обработка ретранслированных навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS в задаче оценивания полного электронного содержания в ионосфере

Е. А. Каплярчук<sup>1</sup>, С. В. Козлов<sup>1✉</sup>, И. Э. Савиных<sup>2</sup>, А. С. Шапкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь  
✉E-mail: kozlov@bsuir.by

<sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь

#### Аннотация

**Цели.** Для способа оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции навигационного сигнала L<sub>1</sub> GPS наноспутником-ретранслятором (СР) на выделенные для геофизических исследований частоты 150/400 МГц и их приема на наземном приемном пункте (ПП) необходимо разработать алгоритмы когерентного накопления принимаемых ретранслированных сигналов и измерения разности их задержек на интервалах наблюдения продолжительностью до единиц секунды.

**Методы.** Предлагаемые алгоритмы предусматривают фазовую демодуляцию принимаемых сигналов на каждой из частот ретрансляции в соответствии с динамикой взаимного пространственного перемещения навигационного спутника (НС), СР и ПП; умножение результата на совмещенную по времени задержки оценку навигационного сообщения, формируемую приемником прямого навигационного сигнала на трассе НС – ПП, внутрипериодную обработку на всей длительности наблюдения в согласованном с сигналом НС фильтре и междупериодное когерентное накопление результатов внутрипериодной обработки на интервале однозначной дальности. Когерентное накопление с учетом случайного неконтролируемого сдвига по частоте ретранслированного сигнала реализуется путем дискретного преобразования Фурье векторов, сформированных для каждого элемента разрешения по времени задержки из междупериодных отсчетов результатов внутрипериодной обработки с учетом миграции дальности при взаимном перемещении НС, СР и ПП.

**Результаты.** Показано, что по выходному сигналу когерентного накопителя возможно обнаружение ретранслированных сигналов на каждой из частот ретрансляции, точное измерение разности времен задержек и оценивание полного электронного содержания на трассе СР – ПП. Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность предлагаемых алгоритмов при оценивании полного электронного содержания на трассе СР – ПП.

**Заключение.** Разработан алгоритм когерентного накопления принимаемых ретранслированных сигналов и измерения разности их задержек, проведено его моделирование. Алгоритм может быть использован при определении ПЭС на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS.

**Ключевые слова:** наноспутник-ретранслятор, глобальная навигационная спутниковая система GPS, навигационный сигнал, полное электронное содержание, внутриволновая обработка, миграция дальности, миграция частоты

**Благодарности.** Работа выполнена частично при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф20Р-329 «Теоретические основы исследования волновых процессов и явлений в ионосфере с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем») и в рамках задания 1.10.3 (Т 103) Государственной программы научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», а также в рамках договора № 220/12 «Разработать алгоритмические и программные средства обработки радиотомографических данных низкоорбитального контроля ионосферы» (4.05.2022–31.12.2025 гг.), заключенного с УП «Геоинформационные системы» по проекту «Разработать космическую систему радиометрического контроля околоземного пространства на базе малого космического аппарата и специализированных наземных средств» (мероприятия подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» Государственной программы «Научные технологии и техника» на 2021–2025 гг.).

**Для цитирования.** Обработка ретранслированных навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS в задаче оценивания полного электронного содержания в ионосфере / Е. А. Каплирчук [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 21–36.  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36>

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

---

Поступила в редакцию | Received 10.03.2023  
Подписана в печать | Accepted 04.04.2023  
Опубликована | Published 29.09.2023

---

## Processing of retransmitted GPS signals in the problem of measuring the total electron content in the ionosphere

Yauheni A. Kapliarchuk<sup>1</sup>, Sergey V. Kozlov<sup>1✉</sup>, Irina E. Savinykh<sup>2</sup>, Aliaksandr S. Shapkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus*

✉E-mail: [kozlov@bsuir.by](mailto:kozlov@bsuir.by)

<sup>2</sup>*The United Institute of Informatics Problems  
of the National Academy of Sciences of Belarus,  
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

### Abstract

**Objectives.** For a method for estimating the total electron content in the ionosphere based on the retransmission of the L<sub>1</sub> GPS navigation signal by a repeater nanosatellite (SR) to the frequencies of 150/400 MHz allocated for geophysical research and their reception at a ground-based receiving point (RP), it is necessary to develop the algorithms for coherent accumulation of received relayed signals and measurement of the difference between their delays at observation intervals up to a few seconds.

**Methods.** The proposed algorithms provide phase demodulation of the received signals at each of the relay frequencies in accordance with the dynamics of the mutual spatial movement of the navigation satellite (NS), SR and RP; multiplying the result by the estimate of the navigation message combined time delay, generated by the receiver of the direct navigation signal on the NS-RP route, intra-period processing over the entire duration of the observation in a filter matched with the signal of the navigation satellite, and inter-period coherent accumulation of the results of intra-period processing at a single-valued range interval. Coherent accumulation, taking into account a random uncontrolled shift in the frequency of the retransmitted signal, is implemented by discrete Fourier transform of the vectors formed for each resolution element in the delay time from inter-period

readings of the results of intra-period processing, taking into account the range migration during the mutual movement of the NS, SR and RP.

**Results.** It is shown that by the output signal of the coherent accumulator makes it is possible to detect retransmitted signals at each of the retransmission frequencies, to measure accurately the difference in delay times, and estimate the total electron content on the SR-RP path. The results of modeling are presented, confirming the efficiency of the proposed algorithms in estimating the total electron content on the SR-RP route.

**Conclusion.** An algorithm for coherent accumulation of received retransmitted signals and measurement of the difference between their delays is developed, and its simulation is performed. The algorithm can be used for estimating TEC based on the retransmission of signals from GPS.

**Keywords:** repeater nanosatellite, global navigation satellite system GPS, navigation signal, total electron content, intra-period processing, range migration, frequency migration

**Acknowledgements.** This work has been partially supported by and carried out with financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project No. F20R-329 "Theoretical foundations of the study of wave processes and phenomena in the ionosphere using signals from satellite radio navigation systems") and task 1.10.3 (T 103) of the State Program of Scientific Research "Digital and space technologies, security of man, society and the state", as well as within the framework of agreement No. 220/12 "Development of algorithmic and software tools for processing radio tomographic data of low-orbit ionosphere monitoring" (05.05.2022–12.31.2025) with UE "Geoinformation Systems" on the project "Develop a Space system for radiometric monitoring of near-Earth space based on a small spacecraft and specialized ground facilities" (activities of subprogram 6 "Research and use of outer space for peaceful purposes" of the State Program "Science-intensive technologies and engineering" for 2021–2025).

**For citation.** Kapliarchuk Y. A., Kozlov S. V., Savinykh I. E., Shapkin A. S. *Processing of retransmitted GPS signals in the problem of measuring the total electron content in the ionosphere.* Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 21–36 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36>

**Conflict of interest.** The authors declare of no conflict of interest.

**Введение.** В работе [1] обоснован способ оценивания полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере на основе ретрансляции навигационных сигналов с использованием малогабаритного СР.

Потенциально наиболее эффективным и относительно несложно реализуемым является вариант способа однозначного оценивания ПЭС на трассе СР – ПП, предусматривающий прием навигационных сигналов GPS от всех видимых НС на частоте  $f_1=1575,42$  МГц на СР, частотную фильтрацию и перенос спектра совокупного принимаемого сигнала на несущие частоты  $f_{p1}=150$  МГц и  $f_{p2}=400$  МГц, усиление и излучение ретранслируемых сигналов в нижнюю полусферу. Прием ретранслированных на двух частотах сигналов осуществляется одним или несколькими наземными ПП. При этом на основе измерения суммарных дальностей  $\hat{d}_{f_1, f_{p1}(2)}$  на трассах НС – СР – ПП и вычисления их разности на двух частотах ретрансляции реализуется оценивание ПЭС  $\overline{TEC}^{(II)}$  на трассе СР – ПП.

Как показано в работе [1], для достижения высокой точности определения ПЭС при малой, порядка долей ватт, выходной мощности ретранслятора необходимо между периодическое когерентное накопление принимаемого сигнала в течение порядка 1 с. За это время из-за высокой орбитальной скорости СР и НС, а также движения ПП, расположенного на поверхности вращающейся Земли, суммарная дальность НС – СР – ПП может изменяться на значительную, до 10...12 км, величину. Это приводит к известным из теории и практики работы радиолокационных станций с синтезированием апертуры явлениям миграции дальности и миграции частоты принимаемого сигнала [2, 3]. Кроме того, необходим учет навигационного сообщения<sup>1, 2</sup> [5]

<sup>1</sup>Современные ГНСС. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru>. – Дата доступа: 18.10.2022.

<sup>2</sup>IS-GPS-200. Navstar GPS Space Segment / Navigation User Segment Interfaces [Electronic resource]. – 2022. – Mode of access: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>. – Date of access: 18.10.2022.

в ретранслированном навигационном сигнале, которое выступает в данном случае в качестве мешающего параметра [4].

Цель настоящей статьи – обоснование и моделирование алгоритмов цифровой обработки принимаемого ретранслированного сигнала и оценивания ПЭС в ионосфере.

**Кинематическая модель взаимного перемещения элементов системы.** Рассмотрим способ оценивания ПЭС в ионосфере на рис. 1.

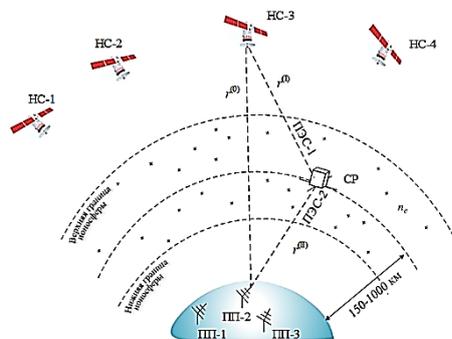


Рис. 1. Способ ретрансляции  
Fig. 1. Relay method

в пределах прямой видимости и с ППП, и с СР. Кроме кривизны поверхности Земли при определении интервалов видимости необходимо учитывать значения ширины главного лепестка диаграмм направленности приемной и передающей антенн СР [1]. На интервалах видимости возможны прием и обработка ретранслированных сигналов на наземном ППП.

Пусть в момент времени  $t_0$  требуется получить аппроксимацию дальности в окрестности точки, расположенной в пределах интервала видимости. Известно, что любая дифференцируемая функция может быть разложена в окрестности точки  $t_0$  в степенной ряд Тейлора. Первые члены этого ряда будут иметь смысл начальной дальности, радиальной скорости и радиального ускорения, а последующие члены – высших производных дальности. Основной вопрос заключается в определении числа членов указанного ряда, необходимых для аппроксимации изменения дальностей НС – СР и СР – ППП с необходимой точностью. Для рассматриваемой задачи с учетом когерентного накопления принимаемого сигнала точность аппроксимации изменения дальности на трассе НС – СР за время наблюдения должна составлять доли длины волны навигационного сигнала, т. е. единицы сантиметра. Отметим, что для решения настоящей задачи важна точность аппроксимации именно изменения дальности, а не абсолютного значения дальности.

Оценим величины радиальных скоростей и радиальных ускорений в рассматриваемой задаче. Вектор  $\vec{V}^{(I)} = \vec{V}_{НС} - \vec{V}_{СР}$  скорости взаимного перемещения НС и СР может быть разложен на две составляющие: радиальную  $\vec{V}_r^{(I)}$  и тангенциальную  $\vec{V}_\tau^{(I)}$ . При этом для типовых высот орбит  $H_{СР} = 200 \dots 1000$  км, а  $|\vec{V}_{СР}| = 7,785 \dots 7,35$  км/с. При расстоянии между НС и СР  $r^{(I)} \approx 20 \dots 22$  тыс. км  $|\vec{V}_{НС}| \approx 3,9$  км/с. Для неподвижного потребителя на поверхности Земли максимальное значение модуля радиальной скорости относительно НС составляет порядка 1 км/с [5]. Так как высота орбиты СР [1] мала в сравнении с радиусом Земли ( $R_3 = 6370$  км), то в качестве верхней оценки можно принять, что  $|\vec{V}_\tau^{(I)}| \approx |\vec{V}_{СР}| + 1$  км/с  $\approx 8,4 \dots 8,8$  км/с. Максимальное радиальное ускорение будет наблюдаться при сложении

Суммарная дальность  $r_n(t) = r_n^{(I)}(t) + r^{(II)}(t)$

между  $n$ -м НС и СР  $r_n^{(I)}(t)$  и между СР и ППП  $r^{(II)}(t)$  изменяется по сложному закону, определяемому орбитальными параметрами движения НС<sup>3, 4</sup> [5], СР [6] и перемещением ППП в соответствии с вращением Земли. При обработке ретранслированных сигналов наиболее важным является вопрос аппроксимации

$\tilde{r}_n(t) = \tilde{r}_n^{(I)}(t) + \tilde{r}^{(II)}(t)$  указанной дальности и ее составляющих на интервалах видимости, т. е. интервалах времени, на которых СР находится в пределах прямой видимости с ППП, а  $n$ -й НС –

<sup>3</sup>URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>

<sup>4</sup>Эфемериды бортовые и точные // Orient Systems – российский производитель ГНСС оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://orsyst.ru/blog10>. – Дата доступа: 18.10.2022.

центростремительных ускорений НС и МКА и составит примерно  $a_{r_{\max}}^{(I)} = \frac{|\vec{V}_{\text{НС}}|^2}{R_3 + H_{\text{НС}}} + \frac{|\vec{V}_{\text{СР}}|^2}{R_3 + H_{\text{СР}}} \approx 9 \text{ м/с}^2$ . Аналогичный, но более трудоемкий анализ показывает, что максимальное значение модуля производной радиального ускорения не превышает сотых долей  $\text{м/с}^3$  и его можно не учитывать.

Подобным способом определим вектор  $\vec{V}^{(II)} = \vec{V}_{\text{СР}} - \vec{V}_{\text{ПП}}$  скорости взаимного перемещения СР и ПП. При расстоянии между СР и ПП  $r^{(II)} \approx 1 \dots 1,5$  тыс. км  $|\vec{V}_{\text{ПП}}| \approx 350 \text{ м/с}$  (расположение ПП в средних широтах). При использовании орбит СР с большим ( $70 \dots 85^\circ$ ) наклоном относительно экватора угол между векторами  $\vec{V}_{\text{СР}}, \vec{V}_{\text{ПП}}$  близок к  $90^\circ$  и  $|\vec{V}_r^{(II)}|_{\max} \approx |\vec{V}_{\text{СР}}| = 7,4 \dots 7,8 \text{ км/с}$ . Максимальное радиальное ускорение, наблюдаемое при расположении ПП на траверсе, составит  $a_{r_{\max}}^{(I)} \approx \frac{|\vec{V}_{\text{СР}}|_{\max}^2}{r^{(II)}} = 300 \dots 54 \text{ м/с}^2$  для высот орбиты  $200 \dots 1000$  км. Максимальное значение модуля производной радиального ускорения может составить единицы  $\text{м/с}^3$  и его учет необходим. Исходя из геометрии наблюдения, минимальное значение угла между вектором скорости СР и направлением на ПП на интервале видимости не будет превышать половину от ширины главного лепестка диаграммы направленности передающей антенны СР (до  $90^\circ$ ). Следовательно,  $|\vec{V}_r^{(II)}|_{\max} \approx (|\vec{V}_{\text{СР}}| + |\vec{V}_{\text{ПП}}|) \cos 45^\circ \approx 6 \text{ км/с}$ .

Таким образом, для относительно коротких (единицы секунды) временных интервалов при аппроксимации составляющих дальности может быть принята модель в виде полинома второй (между НС и СР) и третьей (между СР и ПП) степени вида [7]

$$\begin{aligned} \tilde{r}_n^{(I)}(t) &= \tilde{r}_{0n}^{(I)} + V_{0r_n}^{(I)}(t - t_0) + \frac{1}{2} a_{r_n}^{(I)}(t - t_0)^2; \\ \tilde{r}_0^{(II)}(t) &= \tilde{r}_0^{(II)} + V_{0r}^{(II)}(t - t_0) + \frac{1}{2} a_r^{(II)}(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} a_r'^{(II)}(t - t_0)^3, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tilde{r}_{0n}^{(I)}, V_{0r_n}^{(I)}, a_{r_n}^{(I)}$  – дальность, радиальная скорость и радиальное ускорение между НС и СР в момент времени  $t_0$ ;  $\tilde{r}_0^{(II)}, V_{0r}^{(II)}, a_r^{(II)}, a_r'^{(II)}$  – дальность, радиальная скорость, радиальное ускорение и производная радиального ускорения для трассы СР – ПП в момент времени  $t_0$ .

Коэффициенты полиномов (1) могут быть найдены путем вычисления соответствующих производных от истинных дальностей  $r_n^{(I)}(t), r^{(II)}(t)$ , но более точные значения, обеспечивающие меньшую ошибку аппроксимации, могут быть определены методом наименьших квадратов путем минимизации функции невязок вида

$$\begin{aligned} (\tilde{r}_{0n}^{(I)}, V_{0r_n}^{(I)}, a_{r_n}^{(I)}) &= \arg \min_{r_0, V_r, a_r, i=0} \sum \left( r_0 + V_r(t_i - t_0) + \frac{1}{2} a_r(t_i - t_0)^2 - r_n^{(I)}(t_i) \right)^2; \\ (\tilde{r}_0^{(II)}, V_{0r}^{(II)}, a_r^{(II)}, a_r'^{(II)}) &= \arg \min_{r_0, V_r, a_r, a_r', i=1} \sum \left( r_0 + V_r(t_i - t_0) + \frac{1}{2} a_r(t_i - t_0)^2 + \frac{1}{6} a_r'(t_i - t_0)^3 - r^{(II)}(t_i) \right)^2, \end{aligned}$$

где  $t_i = t_0 + iT_H / I$ ;  $T_H$  – интервал наблюдения;  $I$  – число точек, по которым проводится аппроксимация.

Анализ характерных параметров взаимного перемещения НС – СР и СР – ПП, допустимости аппроксимации (1) и ошибок аппроксимации дальностей проводился на примере движения НС и СР по характерным орбитам. Орбитальные параметры движения НС глобальной навигационной спутниковой системы GPS<sup>5, 6</sup> задавались в соответствии с работой [5]. СР двигался по круговой орбите высотой 500 км и углом наклона 85° при орбитальной скорости 7612 м/с и периодом вращения 5670 с. ПП располагался на уровне моря в точке географической широты 53,9° с. ш. и двигался в соответствии с вращением Земли. Координаты НС, СР и ПП рассчитывались с помощью типовых алгоритмов [5, 6]. Прямая видимость между СР и ПП при указанных условиях будет иметь место в среднем четыре раза за сутки при средней длительности каждого интервала времени наблюдения 300...500 с.

Для одного из интервалов наблюдения при координатах НС в неподвижной геоцентрической системе координат  $x_{\text{CP}} = 4361828$  м,  $y_{\text{CP}} = -462707$  м,  $z_{\text{CP}} = 5288762$  м и координатах ПП  $x_{\text{ПП}} = 3419265$  м,  $y_{\text{ПП}} = -1432686$  м,  $z_{\text{ПП}} = 5181528$  м получены следующие значения коэффициентов аппроксимирующего полинома для дальности  $\tilde{r}^{(\text{II})}(t)$ :  $\tilde{r}_{0n}^{(\text{I})} = 1356,8$  км,  $V_{0r}^{(\text{II})} = -4257,8$  м/с,  $a_r^{(\text{II})} = 26,647$  м/с<sup>2</sup>,  $a_r'^{(\text{II})} = 0,2573$  м/с<sup>2</sup>. В таблице для этих же значений приведены коэффициенты аппроксимирующих полиномов  $\tilde{r}_n^{(\text{I})}(t)$  и координаты для шести из восьми видимых при заданной геометрии наблюдения НС.

Координаты НС и коэффициенты аппроксимирующих полиномов  $\tilde{r}_n^{(\text{I})}(t)$

NS coordinates and parameters of approximating polynomials  $\tilde{r}_n^{(\text{I})}(t)$

		Номер НС Number NS					
		3	4	9	10	11	12
Координаты, м	$x_{\text{НС}}$	24 625 407	3 669 467	17 270 260	14 906 927	11 237 459	18 592 606
	$y_{\text{НС}}$	-5 724 493	-15 094 468	18 463 981	-4 369 382	10 725 086	-13 463 388
	$z_{\text{НС}}$	8 175 424	21 557 135	8 175 424	21 557 135	21 557 135	13 381 711
Коэффициенты	$\tilde{r}_0^{(\text{I})}$ , тыс. км	21 134	21 891	23 091	19 777	20 907	20 905
	$V_{0r}^{(\text{I})}$ , м/с	4397,1	-3393,6	2113,3	-741,2	-2222,6	2514,3
	$a_r^{(\text{I})}$ , м/с <sup>2</sup>	5,913	5,024	4,985	10,0611	10,104	9,991
	$a_r'^{(\text{I})}$ , м/с <sup>3</sup>	-0,008	0,005	-0,002	0,002	0,008	-0,008

На рис. 2 показаны ошибки  $\delta r_n^{(\text{I})}(t) = \tilde{r}_n^{(\text{I})}(t) - r_n^{(\text{I})}(t)$  и  $\delta r^{(\text{II})}(t) = \tilde{r}^{(\text{II})}(t) - r^{(\text{II})}(t)$  аппроксимации дальности для временного интервала наблюдения  $T_{\text{н}} = 1$  с.

Модуль ошибки аппроксимации дальности НС – СР при использовании полинома второй степени не превышает 1,5 мм, что составляет менее 1 % от длины волны сигнала на частоте  $f_1$ . Для указанной трассы модули радиальных скоростей могут составлять до 5 км/с, радиальное ускорение на интервале видимости всегда положительно и имеет величину до  $\approx 10$  м/с<sup>2</sup>. Модули ошибок аппроксимации дальности СР – ПП при использовании полинома третьей степени пренебрежимо малы и не превышают сотые доли миллиметра, что существенно лучше предъявляемых требований, однако при использовании полинома второй степени ошибки могут возрасти до долей метра, что недопустимо для длины волны 0,75 м, соответствующей частоте ретрансляции 400 МГц.

<sup>5</sup>URL: <https://www.glonass-iac.ru>

<sup>6</sup>URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>

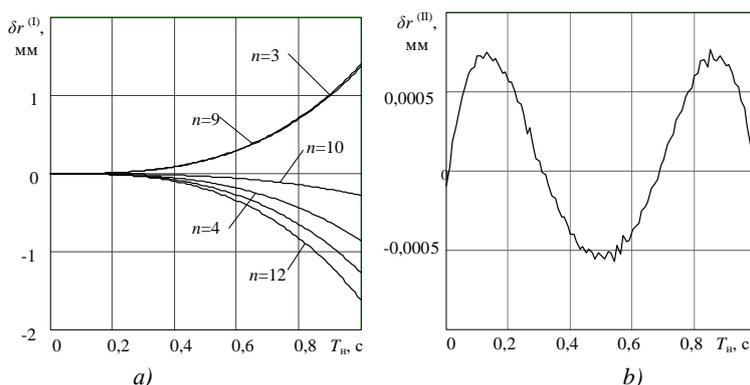


Рис. 2. Типовые ошибки аппроксимации дальности на интервале наблюдения:

a) ошибка аппроксимации  $r^{(I)}$ ; b) ошибка аппроксимации  $r^{(II)}$

Fig. 2. Typical range approximation errors over the observation interval:

a) approximation error  $r^{(I)}$ ; b) approximation error  $r^{(II)}$

Таким образом, кинематическая модель показывает, что для аппроксимации дальности при времени наблюдения (накопления) порядка 1,0 с необходимо использовать полиномы второй степени для трассы НС – СР и третьей степени для трассы СР – ПП. Параметры указанных полиномов представляют собой радиальные скорости, ускорения и производные ускорений и используются для компенсации миграций дальности и частоты в процессе когерентного накопления ретранслированного сигнала в ПП.

**Модель принимаемой реализации и принимаемые допущения.** В соответствии с работой [1] принимаемые на двух частотах  $f_{p1}, f_{p2}$  сигналы при ретрансляции навигационного сигнала  $n$ -го НС GPS на частоте  $f_1$  запишутся в виде

$$\begin{aligned} \dot{S}_{f_{p1}}^{(n)}(t) &= D_{f_1}^{(n)}\left(t - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t)\right) X_{f_1}^{(n)}\left(t - \tau_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t)\right) e^{j\varphi_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t)}; \\ \dot{S}_{f_{p2}}^{(n)}(t) &= D_{f_1}^{(n)}\left(t - \tau_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t)\right) X_{f_1}^{(n)}\left(t - \tau_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t)\right) e^{j\varphi_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $D_{f_1}^{(n)}(t), X_{f_1}^{(n)}(t)$  – навигационное сообщение и дальномерный код  $n$ -го НС [2, 3] на частоте  $f_1$ ;  $\tau_{f_1, f_{p1(2)}}^{(n)}(t), \varphi_{f_1, f_{p1(2)}}^{(n)}(t)$  – времена задержки и законы фазовой модуляции принимаемых сигналов от  $n$ -го НС на трассе распространения НС – СР – ПП, определяемые как равенства

$$\begin{aligned} \tau_{f_1, f_{p1(2)}}^{(n)}(t) &= \frac{1}{c} \left( r_n^{(I)}(t) + \frac{A \cdot TEC_n^{(I)}(t)}{f_1^2} + r^{(II)}(t) + \frac{A \cdot TEC^{(II)}(t)}{f_{p1(2)}^2} \right); \\ \varphi_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t) &= 2\pi(f_{p1} + \delta_{f_{p1}})t - 2\pi \frac{f_{p1}}{c} r^{(II)}(t) - 2\pi \frac{f_1}{c} r_n^{(I)} \left( t - \frac{r^{(II)}(t)}{c} \right) + \\ &+ \frac{2\pi A}{c} \left( \frac{TEC_n^{(I)}(t)}{f_1} + \frac{TEC^{(II)}(t)}{f_{p1}} \right) + \delta\varphi_{f_1, f_{p1}}^{(n)}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t) &= 2\pi(f_{p1} + \delta_{f_{p2}})t - 2\pi \frac{f_{p2}}{c} r^{(II)}(t) - 2\pi \frac{f_1}{c} r_n^{(I)} \left( t - \frac{r^{(II)}(t)}{c} \right) + \\ &+ \frac{2\pi A}{c} \left( \frac{TEC_n^{(I)}(t)}{f_1} + \frac{TEC^{(II)}(t)}{f_{p2}} \right) + \delta\varphi_{f_1, f_{p2}}^{(n)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $A \approx 40,308 \text{ м}^3 \text{ Гц}^2$  [1],  $r_n^{(I)}(t)$  – закон изменения дальности  $n$ -й трассы НС – СР;  $r^{(II)}(t)$  – закон изменения дальности трассы СР – ПП;  $TEC_n^{(I)}(t)$ ,  $TEC^{(II)}(t)$  – законы изменения ПЭС на трассах НС – СР и СР – ПП соответственно;  $\delta_{f_{p1(2)}}$  – паразитные сдвиги частоты принимаемого сигнала на интервале наблюдения, определяемые нестабильностью гетеродинов ретранслятора и аппаратуры ПП. Указанные паразитные сдвиги являются развитием модели принимаемого сигнала, приведенной в работе [1], в части учета погрешностей аппаратуры ретрансляции и ПП.

Так как длительность  $T_H$  интервала наблюдения ( $T_H \approx 1 \text{ с}$ ) мала, на интервале наблюдения  $[t_0, t_0 + T_H]$ , где  $t_0$  – момент начала интервала наблюдения, полагаем значения ПЭС неизменными:  $TEC_n^{(I)}(t) = TEC_n^{(I)}$ ,  $TEC^{(II)}(t) = TEC^{(II)}$ .

Величины  $\delta_{f_{p1(2)}}$  определяются долговременной и кратковременной относительной нестабильностью  $\gamma_{f_r}$  частоты гетеродинов СР и ПП. При использовании опорных генераторов с  $\gamma_{f_r} = 10^{-7} \dots 10^{-6}$  получим  $\delta_{f_{p1(2)}} = \gamma_{f_r} (f_1 + f_{p1(2)}) \approx 200 \dots 2000 \text{ Гц}$ . Величина  $\delta_{f_{p1(2)}}$  полагается неизвестной и должна быть оценена и скомпенсирована при обработке.

Дальномерные коды  $X_{f_1}^{(n)}(t)$  НС GPS на частоте  $f_1$  известны<sup>7-9</sup> [5], навигационные сообщения  $D_{f_1}^{(n)}(t)$  могут быть оценены при приеме на ПП прямых навигационных сигналов от НС аналогично, например, работе [4]. Символы навигационного сообщения длительностью 20 мс и дискреты дальномерных кодов длительностью 0,977517 мкс принимают значения  $\pm 1$ , что соответствует фазовой манипуляции  $0, \pi$ <sup>7-9</sup> [5].

Полагаем также, что координаты и параметры движения НС, СР и ПП известны в каждый момент времени с требуемой для обработки точностью. При этом координаты фазового центра антенны НС при постобработке могут быть определены по ультрабыстрым эфемеридам с точностью порядка  $5 \text{ см}^{10}$ , координаты фазового центра антенны ПП определяются с соизмеримой точностью геодезическими методами. Орбитальные параметры СР и зависимые от них параметры взаимного перемещения НС, СР и ПП, а именно начальные радиальные скорости  $V_{0r}^{(I)}$ ,  $V_{0r}^{(II)}$  и радиальные ускорения  $a_r^{(I)}$ ,  $a_r^{(II)}$  на трассах НС – СР и СР – ПП, известны с ошибками, не большими, чем разрешающие способности по указанным параметрам, и определяемыми следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} \Delta V_r^{(I)} &= \frac{c}{2f_1 T_H}; & \Delta V_r^{(II)} &= \frac{c}{2f_{p2} T_H}; \\ \Delta a_r^{(I)} &= \frac{c}{2f_1 T_H^2}; & \Delta a_r^{(II)} &= \frac{c}{2f_{p2} T_H^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

При  $T_H = 1 \text{ с}$  имеем  $\Delta V_r^{(I)} = 0,095 \text{ м/с}$ ,  $\Delta V_r^{(II)} = 0,375 \text{ м/с}$ ,  $\Delta a_r^{(I)} = 0,095 \text{ м/с}^2$ ,  $\Delta a_r^{(II)} = 0,375 \text{ м/с}^2$ .

<sup>7</sup>URL: <https://www.glonass-iac.ru>

<sup>8</sup>URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>

<sup>9</sup>IS-GPS-800J. Navstar GPS Space Segment / User Segment L1C Interfaces [Electronic resource]. – 2022. – Mode of access: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800J.pdf>. – Date of access: 18.10.2022.

<sup>10</sup>URL: <https://orsyst.ru/blog10>

Принимаемые на частотах  $f_{p1}, f_{p2}$  сигналы от всех видимых НС запишутся в виде

$$\begin{aligned}\dot{S}_{f_{p1}}^{(\Sigma)}(t) &= \dot{N}_{f_{p1}}(t) + \sum_{n \in \mathbf{n}_V} \dot{S}_{f_{p1}}^{(n)}(t); \\ \dot{S}_{f_{p2}}^{(\Sigma)}(t) &= \dot{N}_{f_{p2}}(t) + \sum_{n \in \mathbf{n}_V} \dot{S}_{f_{p2}}^{(n)}(t),\end{aligned}\quad (6)$$

где  $\dot{N}_{f_{p1}}(t)$ ,  $\dot{N}_{f_{p2}}(t)$  – независимые гауссовские белые шумы приемных каналов на частотах  $f_{p1}, f_{p2}$  с односторонней спектральной плотностью мощности  $N_0$ ;  $\mathbf{n}_V$  – множество номеров видимых НС при наблюдении с СР.

При квадратурном переносе принимаемых сигналов на видеочастоту с использованием опорных гетеродинов с частотами  $f_{p1}, f_{p2}$  и аналого-цифрового преобразования с частотой дискретизации  $F_s$  отсчеты принимаемых сигналов в моменты времени  $t_m = t_0 + (m-1)/F_s$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $M = [T_H F_s]$  можно записать в виде равенств

$$\begin{aligned}\dot{S}_{f_{p1}}^{(\Sigma)}(m) &= \dot{N}_{f_{p1}}(t_m) + \sum_{n \in \mathbf{n}_V} \dot{S}_{f_{p1}}^{(n)}(t_m) e^{-j2\pi f_{p1} t_m}; \\ \dot{S}_{f_{p2}}^{(\Sigma)}(m) &= \dot{N}_{f_{p2}}(t_m) + \sum_{n \in \mathbf{n}_V} \dot{S}_{f_{p2}}^{(n)}(t_m) e^{-j2\pi f_{p2} t_m}.\end{aligned}\quad (7)$$

При этом составляющие отсчетов, обусловленные сигналами  $n$ -го НС, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{S}_{f_{p1}}^{(n)}(m) &= D_{f_1}^{(n)}(t_m - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)) X_{f_1}^{(n)}(t_m - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)) e^{j\beta_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)} e^{j2\pi\delta_{f_{p1}} t_m} e^{j\varphi_1}; \\ \dot{S}_{f_{p2}}^{(n)}(m) &= D_{f_1}^{(n)}(t_m - \tau_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t_m)) X_{f_1}^{(n)}(t_m - \tau_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t_m)) e^{j\beta_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t_m)} e^{j2\pi\delta_{f_{p2}} t_m} e^{j\varphi_2}; \\ \varphi_1 &= \delta\varphi_{f_1, f_{p1}}^{(n)} + \frac{A}{c} \left( \frac{TEC_n^{(I)}}{f_1} + \frac{TEC^{(II)}}{f_{p1}} \right); \quad \varphi_2 = \delta\varphi_{f_1, f_{p2}}^{(n)} + \frac{A}{c} \left( \frac{TEC_n^{(I)}}{f_1} + \frac{TEC^{(II)}}{f_{p2}} \right); \\ \beta_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t) &= 2\pi \left( -\frac{f_{p1}}{c} r^{(II)}(t) - \frac{f_1}{c} r_n^{(I)} \left( t - \frac{r^{(II)}(t)}{c} \right) \right); \\ \beta_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t) &= 2\pi \left( -\frac{f_{p2}}{c} r^{(II)}(t) - \frac{f_1}{c} r_n^{(I)} \left( t - \frac{r^{(II)}(t)}{c} \right) \right).\end{aligned}\quad (8)$$

**Алгоритм обработки.** Для проведения измерения ПЭС по сигналу  $n$ -го НС осуществим демодуляцию принимаемых сигналов по двум характеристикам: законам изменения фазы и навигационному сообщению. Демодуляция по закону изменения фазы выполняется в текущем времени с использованием аппроксимирующих полиномов кинематической модели взаимного перемещения НС, СР и ПП, демодуляция по навигационному сообщению – по оценке  $\widehat{D}_{пр}^{(n)}(t)$  навигационного сообщения по прямому навигационному сигналу на трассе НС – ПП на частоте  $f_1$ . При условии, что навигационное сообщение принимается безошибочно, можно записать

$$\widehat{D}_{пр}^{(n)}(t + \tau_0^{(n)}(t_m) - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)) \approx D_{f_1}^{(n)}(t - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t)).$$

Здесь  $\tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t)$  определяется согласно (3), но в пренебрежении ПЭС, а временная задержка прямого сигнала находится из равенства

$$\tau_0^{(n)}(t) = \frac{1}{c} \left( r_n^{(0)}(t) + \frac{A \cdot TEC_n^{(0)}(t)}{f_{1(2)}^2} \right) \approx \frac{r_n^{(0)}(t)}{c},$$

где  $TEC_n^{(0)}(t)$  – ПЭС на трассе НС – ПП;  $r_n^{(0)}(t)$  – дальность НС – ПП прямого навигационного сигнала на трассе НС – ПП, причем всегда  $\tau_0^{(n)}(t_m) < \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)$ .

После демодуляции получим

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{f_{p1}}^{(Z_n)}(m) &= \dot{S}_{f_{p1}}^{(\Sigma)}(t_m) \widehat{D}_{f_1}^{(n)}(t_m + \tau_0^{(n)}(t_m) - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)) e^{-j\beta_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)}; \\ \dot{Y}_{f_{p2}}^{(Z_n)}(m) &= \dot{S}_{f_{p2}}^{(\Sigma)}(t_m) D_{f_1}^{(n)}(t_m + \tau_0^{(n)}(t_m) - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)) e^{-j\beta_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t_m)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Компоненты демодулированных сигналов для  $n$ -го НС с учетом того, что  $|\widehat{D}_{\text{пр}}^{(n)}(t)|^2 = 1$ , примут вид

$$\begin{aligned} \dot{S}_{f_{p1}}^{(n)}(m) &= X_{f_1}^{(n)}(t_m - \tau_{f_1, f_{p1}}^{(n)}(t_m)) e^{j2\pi\delta_{f_{p1}} t_m} e^{j\varphi_1}; \\ \dot{S}_{f_{p2}}^{(n)}(m) &= X_{f_1}^{(n)}(t_m - \tau_{f_1, f_{p2}}^{(n)}(t_m)) e^{j2\pi\delta_{f_{p2}} t_m} e^{j\varphi_2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из равенств (10) следует, что компоненты демодулированного сигнала для  $n$ -го НС на каждой из частот ретрансляции представляют собой последовательность повторяющихся законов модуляции (дальномерных кодов), плавно сдвигаемых от одного периода повторения к другому по времени задержки. Это отражает время-импульсную модуляцию сигнала из-за пространственного перемещения НС, СР и ПП. Кроме того, сигналы имеют сдвиг на неизвестные частоты  $\delta_{f_{p1(2)}}$  и несущественные начальные фазы. Разные значения времен задержки сигналов определяются разной ионосферной задержкой на трассе СР – ПП.

При максимальном модуле суммарной радиальной скорости на трассах распространения 12 км/с изменение временной задержки на длительности (периоде) навигационного сигнала ( $T_0 = T_r = 1$  мс) не превысит 4 нс. Для относительно узкополосного навигационного сигнала такое изменение времени задержки не оказывает существенного влияния на его спектрально-временную структуру и обработка этого сигнала возможна в согласованном с исходным сигналом (дальномерным кодом на нулевой частоте) фильтре.

Будем полагать, что  $\delta_{f_{p1}} < 1/T_0$ . Выполним внутрипериодную обработку принятых сигналов с использованием метода быстрой свертки. Для этого вычислим дискретное преобразование Фурье над векторами  $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$  отсчетов сигналов:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_1 &= FFT(\mathbf{s}_1); \mathbf{s}_1 = \left( \dot{S}_{f_{p1}}^{(n)}(1), \dots, \dot{S}_{f_{p1}}^{(n)}(M) \right)^T; \\ \mathbf{g}_2 &= FFT(\mathbf{s}_2); \mathbf{s}_2 = \left( \dot{S}_{f_{p2}}^{(n)}(1), \dots, \dot{S}_{f_{p2}}^{(n)}(M) \right)^T. \end{aligned} \quad (11)$$

Вектор  $\mathbf{h}$  отсчетов импульсной характеристики и вектор  $\mathbf{v}$  отсчетов амплитудно-фазочастотной характеристики согласованного фильтра находятся из выражений

$$\mathbf{h} = \left( \underbrace{X_{f_1}^{(n)}(T_0), X_{f_1}^{(n)}(T_0 - (m-1)/F_s), \dots, X_{f_1}^{(n)}(0)}_{[T_0 F_s] \text{ ненулевых значений}}, \underbrace{0, \dots, 0}_{M - [T_0 F_s] \text{ значений}} \right)^T, \quad \mathbf{v} = FFT(\mathbf{h}). \quad (12)$$

Выполним когерентное накопление сигнала для  $z = \overline{1, Z}$ ,  $Z = [T_0 F_s]$  отсчетов, соответствующих однозначно определяемой в пределах одного периода повторения навигационного сигнала суммарной дальности.

После дискретного обратного преобразования Фурье поэлементного произведения указанных векторов получим векторы  $\mathbf{u}_{1(2)}$  отсчетов сигналов на выходе внутрипериодной обработки (сжатия) сигналов:

$$\mathbf{u}_{1(2)} = \text{IFFT}(\mathbf{g}_{1(2)} \otimes \mathbf{v}); \quad \mathbf{u}_{1(2)} = (\dot{U}_{1(2)}(1), \dot{U}_{1(2)}(2), \dots, \dot{U}_{1(2)}(M))^T. \quad (13)$$

Рассмотрим перемещения максимума сигнала на выходе согласованного фильтра. Если максимум сигнала на выходе согласованного фильтра для первого периода повторения находился в  $z = m$ -м отсчете, то для  $k$ -го периода повторения,  $k = \overline{1, K}$ ,  $K = [T_H / T_0]$ , он сдвинется на величину

$$\delta m_k = \left\lceil \frac{F_s}{c} \left( r^{(II)}(t_0 + (k-1)T_0) - r^{(II)}(t_0) + r_n^{(I)} \left( t_0 + (k-1)T_0 - \frac{r^{(II)}(t_0 + (k-1)T_0)}{c} \right) - r_n^{(I)} \left( t_0 - \frac{r^{(II)}(t_0)}{c} \right) \right) \right\rceil, \quad (14)$$

где  $\lceil x \rceil$  – округление до ближайшего целого по сравнению с ожидаемым значениям, и будет иметь индекс  $m_k = z + (k-1)Z + \delta m_k$ .

Сформируем для каждого  $z$ -го отсчета векторы междупериодных отсчетов сигналов

$$\mathbf{w}_{1(2)}^{(z)} = (U_{1(2)}(z), U_{1(2)}(z + Z + \delta m_1), U_{1(2)}(z + 2Z + \delta m_2), \dots, U_{1(2)}(z + (M-1)Z + \delta m_M))^T, \quad (15)$$

содержащие отсчеты сигнала на выходе внутрипериодной обработки для случая, когда максимум сигнала для первого периода повторения находится в  $z$ -м отсчете в пределах первого периода повторения принимаемого сигнала, и выполним дискретное преобразование Фурье над каждым из векторов  $\mathbf{w}_{1(2)}^{(z)}$ :

$$\boldsymbol{\Psi}_{1(2)}^{(z)} = \text{FFT}(\mathbf{w}_{1(2)}^{(z)}); \quad \boldsymbol{\Psi}_{1(2)}^{(z)} = (\dot{\Psi}_{1(2)}^{(z)}(1), \dot{\Psi}_{1(2)}^{(z)}(2), \dots, \dot{\Psi}_{1(2)}^{(z)}(Z))^T.$$

Операции (14), (15) вычисления индексов при формировании вектора междупериодных отсчетов аналогичны компенсации миграции дальности на радиолокационной станции с синтезированием апертуры с использованием известного алгоритма BackProjection [2, 3].

Полученные наборы векторов  $\boldsymbol{\Psi}_{1(2)}^{(z)}$  удобно представить в виде матрицы

$$\boldsymbol{\Psi}_{1(2)} = \begin{pmatrix} \dot{\Psi}_{1(2)}^{(1)}(1) & \dot{\Psi}_{1(2)}^{(1)}(2) & \dots & \dot{\Psi}_{1(2)}^{(1)}(K) \\ \dot{\Psi}_{1(2)}^{(2)}(1) & \dot{\Psi}_{1(2)}^{(2)}(2) & \dots & \dot{\Psi}_{1(2)}^{(2)}(K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{\Psi}_{1(2)}^{(Z)}(1) & \dot{\Psi}_{1(2)}^{(Z)}(2) & \dots & \dot{\Psi}_{1(2)}^{(Z)}(K) \end{pmatrix},$$

строки которой отражают дискретное время задержки в пределах периода повторения, а столбцы – дискретный сдвиг сигнала по частоте. Отсчеты  $\dot{\Psi}_{1(2)}^{(z)}(q)$  являются результатом когерент-

ного накопления сигнала для отсчета  $z$  и при сдвиге частоты, соответствующем индексу  $q$ . Для радиолокаторов с синтезированием апертуры аналогом матриц  $\Psi_{1(2)}$  служат комплексные радиолокационные изображения [2, 3].

Найдем индексы сигналов с максимальной амплитудой на выходе когерентного накопителя (КН)

$$(z_1, q_1) = \arg \max_{z, q} |\dot{\Psi}_1^{(z)}(q)|^2, (z_2, q_2) = \arg \max_{z, q} |\dot{\Psi}_2^{(z)}(q)|^2 \quad (16)$$

и проверим условия обнаружения сигналов

$$|\dot{\Psi}_1^{(z_1)}(q_1)|^2 \geq \ell_0; |\dot{\Psi}_2^{(z_2)}(q_2)|^2 \geq \ell_0,$$

где  $\ell_0$  – порог обнаружения.

При выполнении условий обнаружения необходимо осуществить точное измерение времен задержек сигналов, т. е. уточнить положение максимумов результатов когерентного накопления на оси временных задержек. Для этого может быть использована параболическая аппроксимация [7] модуля (для сильного сигнала) или квадрата модуля (для слабого сигнала) выходного сигнала когерентного накопителя в окрестности максимума вида

$$|\dot{\Psi}_{1(2)}^{(z)}(q_{1(2)})|^2 = a_{1(2)}z^2 + b_{1(2)}z + c_{1(2)}, \quad (17)$$

где  $a_{1(2)}, b_{1(2)}, c_{1(2)}$  – коэффициенты параболической аппроксимации, определяемые равенством

$$\begin{pmatrix} a_{1(2)} \\ b_{1(2)} \\ c_{1(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (z_{1(2)} - 1)^2 & z_{1(2)} - 1 & 1 \\ z_{1(2)}^2 & z_{1(2)} & 1 \\ (z_{1(2)} + 1)^2 & z_{1(2)} + 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} |\dot{\Psi}_{1(2)}^{(z_{1(2)}-1)}(q_{1(2)})|^2 \\ |\dot{\Psi}_{1(2)}^{(z_{1(2)})}(q_{1(2)})|^2 \\ |\dot{\Psi}_{1(2)}^{(z_{1(2)}+1)}(q_{1(2)})|^2 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Отсюда следуют оценки уточненных (дробных) индексов максимумов

$$\langle z_{1(2)} \rangle = -\frac{b_{1(2)}}{2a_{1(2)}}. \quad (19)$$

Используя оценки  $\langle z_{1(2)} \rangle$ , определим оценки ПЭС на трассе СР – ПП:

$$TEC_n^{(II)} = \frac{c(\langle z_1 \rangle - \langle z_2 \rangle)}{F_s A \left( \frac{1}{f_{p1}^2} - \frac{1}{f_{p2}^2} \right)}. \quad (20)$$

**Результаты моделирования.** Моделирование предлагаемого способа оценивания ПЭС проводилось путем воспроизведения движения НС и СР по заданным орбитам и ПП на поверхности Земли, задания значений ПЭС на трассах НС – СР и СР – ПП, воспроизведения дискретных

реализаций принимаемых на ПП сигналов от всех видимых НС в соответствии с (7), их обработки в соответствии с (9)–(15) и оценивания ПЭС на трассе СР – ПП в соответствии с (20).

Рассматриваемая пространственная ситуация аналогична приведенной в таблице. Частота дискретизации в приемнике ПП составила 2 МГц, истинное значение ПЭС на трассе СР – ПП составило 10,4 ТЕСч, что соответствует разности задержек сигналов на частотах ретрансляции  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$  160 м. Паразитные сдвиги частоты ретрансляции составили  $\delta_{f_{p1}}=10$  Гц и  $\delta_{f_{p2}}=26,7$  Гц с коэффициентом пропорциональности 400/150.

Принимаемый на ПП сигнал (первые 5000 отсчетов) изображен на рис. 3. Он не отличим от шума, амплитуды ретранслированных навигационных сигналов на 20...25 дБ ниже уровня внутреннего шума приемника.

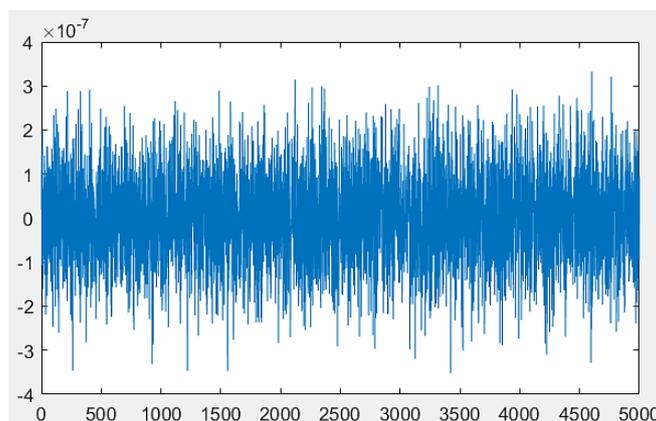


Рис. 3. Вид принимаемого сигнала

Fig. 3. Type of received signal

На рис. 4 показаны результаты обработки принимаемой реализации для НС с  $n=4$  и  $n=10$  в виде модулей элементов матриц  $\mathbf{W}_{1(2)}^{(z)}$  результатов внутрипериодной обработки с компенсацией миграции дальности и матриц  $\Psi_{1(2)}$  результатов когерентного накопления. Оси с численными значениями 0...400 и 0...500 соответствуют отсчету по времени задержки в пределах периода повторения навигационного сигнала, ось 0...100 – отсчетам дискретного преобразования Фурье по периодам повторения (показана часть формируемой матрицы). Коэффициент ретрансляции СР [1] таков, что отношение сигнал/шум (без учета внутрисистемных помех) составляет 41 дБ для частоты ретрансляции  $f_{p1}$  и 32,5 дБ – для частоты ретрансляции  $f_{p2}$ . Указанные различия приводят к тому, что для частоты  $f_{p1}$  отношение сигнал/шум после внутрипериодной обработки составляет около 11 дБ, поэтому результаты этой обработки после компенсации миграции дальности проявляются в виде «гребня» сигналов в разных периодах повторения и фиксированного номера отсчета в пределах одного периода повторения.

Для частоты  $f_{p2}$  отношение сигнал/шум после внутрипериодной обработки не превышает 1 дБ и соответствующий «гребень» не наблюдается. Различия в отношении сигнал/шум по результатам когерентного накопления можно проследить по меньшему значению максимума в матрице  $\Psi_2$  в сравнении с матрицей  $\Psi_1$ . Максимумы результатов обработки по оси частот находятся в 11-м и 28-м отсчетах (начальное значение – единичное), что точно соответствует паразитному сдвигу частоты ретранслированного сигнала. Приблизительная разность времен задержки сигналов на частотах  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$  составляет  $2/F_s=1$  мкс и  $1/F_s=0,5$  мкс при выделении сигнала от НС с  $n=4$  и  $n=10$ .

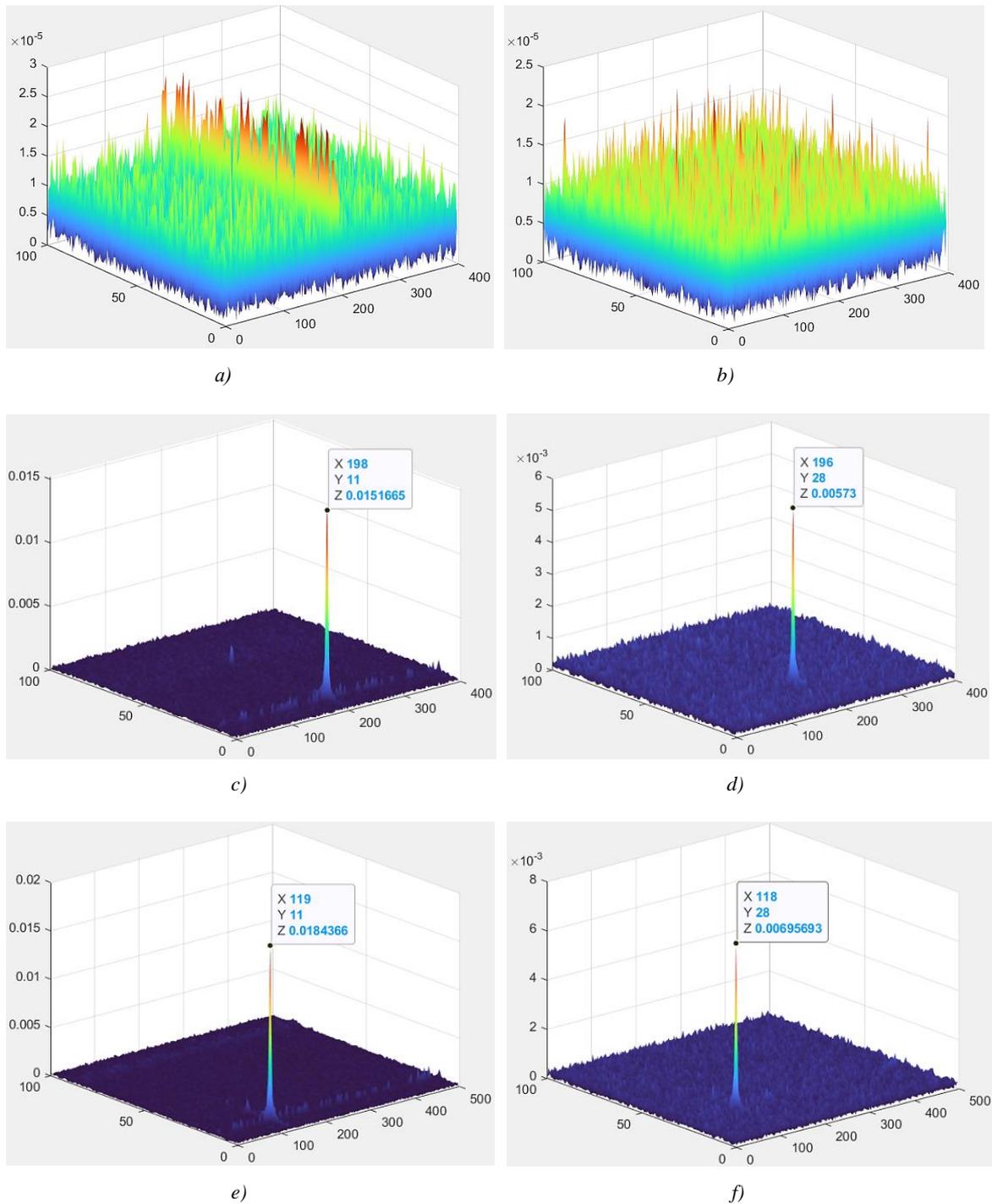


Рис. 4. Результаты обработки принимаемого сигнала:

- a)  $n=4$ , частота  $f_{p1}$ , после внутрипериодной обработки и компенсации миграции дальности;  
 b)  $n=4$ , частота  $f_{p2}$ , после внутрипериодной обработки и компенсации миграции дальности;  
 c)  $n=4$ , частота  $f_{p1}$ , на выходе КН; d)  $n=4$ , частота  $f_{p2}$ , на выходе КН;  
 e)  $n=10$ , частота  $f_{p1}$ , на выходе КН; f)  $n=10$ , частота  $f_{p2}$ , на выходе КН

Fig. 4. The results of processing the received signal:

- a)  $n=4$ , frequency  $f_{p1}$ , after intra-period processing and range migration compensation;  
 b)  $n=4$ , frequency  $f_{p2}$ , after intra-period processing and range migration compensation;  
 c)  $n=4$ , frequency  $f_{p1}$ , at the output of the VF; d)  $n=4$ , frequency  $f_{p2}$ , at the output of the VF;  
 e)  $n=10$ , frequency  $f_{p1}$ , at the output of the VF; f)  $n=10$ , frequency  $f_{p2}$ , output VF

Результаты параболической аппроксимации выходного сигнала КН в окрестности максимума приведены на рис. 5. Отсчеты сигналов на  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$  показаны квадратными и круглыми маркерами соответственно, а аппроксимирующие параболы – пунктирными линиями.

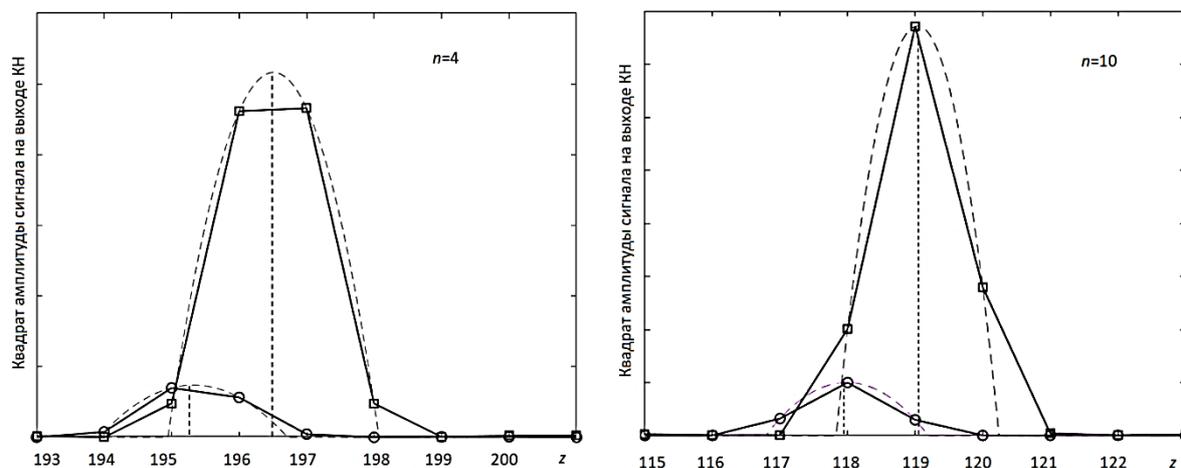


Рис. 5. Уточнение оценок времен задержек принимаемых сигналов

Fig. 5. The results of processing the received signal

Для сигналов одного из НС с  $n=4$  уточнение существенно, с  $n=10$  – менее существенно. Уточненные оценки позволили согласно равенству (20) вычислить разность времен запаздывания, которая составила для  $n=4$   $(\langle z_1 \rangle - \langle z_2 \rangle) / c = 0,554$  мкс (измеренное значение ПЭС-2 10,8 ТЕСу) и для  $n=10$   $(\langle z_1 \rangle - \langle z_2 \rangle) / c = 0,539$  мкс (измеренное значение ПЭС-2 10,5 ТЕСу) при истинном значении ПЭС-2 10,4 ТЕСу. Измеренные ПЭС по восьми видимым НС составили 10,2; 10,8; 10,0; 10,2; 10,3; 10,2; 10,1; 10,1 ТЕСу при среднем значении 10,24 ТЕСу, т. е. измерения являются точными.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возможность когерентного накопления ретранслированного на выделенные частоты навигационного сигнала и возможность высокоточного измерения ПЭС на трассе СР – ПП. Эти же алгоритмы обработки могут быть использованы и при определении ПЭС по ретрансляции двух частот  $f_1$  и  $f_2$  на одну из частот ретрансляции, но требования к отношению сигнал/шум в этом случае существенно выше [1].

**Вклад авторов.** С. В. Козлов определил цели работы, обосновал временное представление сигналов; Е. А. Каплярчук реализовал алгоритм когерентного накопления для определения ПЭС на основе ретранслированного сигнала, провел расчеты и моделирование; И. Э. Савиных обосновала требования и процедуры измерения ПЭС для реализации радиотомографии ионосферы; А. С. Шапкин осуществил консультирование по орбитальным параметрам кинематической модели, обосновал фазовый метод определения ПЭС на основе ретранслированного сигнала.

#### Список использованных источников

1. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов [и др.]; под ред. В. Т. Горяинова. – М. : Радио и связь, 1988. – 304 с.
3. Купряшкин, И. Ф. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением : монография / И. Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Д. Б. Рязанцев. – М. : Радиотехника, 2020. – 280 с.
4. Куан, Н. В. Пассивная радиолокационная система мониторинга движения судов в прибрежных районах с использованием спутниковых сигналов подсвета / Н. В. Куан // Изв. высших учебных заведе-

ний России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 41–52. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52>

5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ИПРЖР, 2010. – 800 с.

6. Саврасов, Ю. С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю. С. Саврасов. – М. : Радио и связь, 1985. – 216 с.

7. Козлов, С. В. Совместное обнаружение-измерение дальности элементов групповой цели в обзорных радиолокационных станциях с использованием оценочно-компенсационного подхода / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Докл. БГУИР. – 2018. – № 4. – С. 79–86.

## References

1. Belokonov I. V., Krot A. M., Kozlov S. V., Kapliarchuk Y. A., Savinykh I. E., Shapkin A. S. *A method for estimating the total electron content in the ionosphere based on the retransmission of signals from the global navigation satellite system GPS*. Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 2, pp. 7–27 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>

2. Antipov V. N., Goryainov V. T., Kulin A. N., Mansurov V. V. Radiolokacionnye stancii s cifrovym sintezirovaniem apertury anteny. *Radar Stations with Digital Antenna Aperture Synthesis*. In V. T. Goryainova (ed.). Moscow, Radio i svjaz', 1988, 304 p. (In Russ.).

3. Kupryashkin I. F., Lihachev V. P., Rjazancev D. B. Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem. *Small-sized multifunctional radars with continuous partial-modulated radiation*. Moscow, Radiotekhnika, 2020, 280 p. (In Russ.).

4. Kuan N. V. *Passive radar system for monitoring the movement of ships in coastal areas using satellite illumination signals*. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika [News of higher educational institutions in Russia, Radioelectronics], 2020, vol. 23, no. 3, pp. 41–52. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-3-41-52> (In Russ.).

5. GLONASS. Principy postroenija i funkcionirovanija. *GLONASS. Principles of Construction and Functioning*. In A. I. Perov, V. N. Kharisov (eds.), 4th ed. Moscow, IPRZhR, 2010, 800 p. (In Russ.).

6. Savrasov Yu. S. Algoritmy i programmy v radiolokacii. *Algorithms and Programs in Radar*. Moscow, Radio i svjaz', 1985, 216 p. (In Russ.).

7. Kozlov S. V., Wu Thanh Ha. Sovmestnoe obnaruzhenie-izmerenie dal'nosti jelementov gruppovoj celi v obzornyh radiolokacionnyh stancijah s ispol'zovaniem ocenочно-kompensacionnogo podhoda. *Joint detection and measurement of the range of elements of a group target in surveillance radar stations using the evaluation-compensation approach*. Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2018, no. 4, pp. 79–86 (In Russ.).

## Информация об авторах

Каплярчук Евгений Александрович, аспирант кафедры информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.  
E-mail: ek.genia13@gmail.com

Козлов Сергей Вячеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.  
E-mail: kozlov@bsuir.by

Савиных Ирина Эдуардовна, инженер-программист, лаборатория моделирования самоорганизующихся систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.  
E-mail: rct.savinykh@gmail.com

Шапкин Александр Сергеевич, аспирант, лаборатория моделирования самоорганизующихся систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.  
E-mail: shap1kin2@gmail.com

## Information about the authors

Yauheni A. Kapliarchuk, Postgraduate Student at the Information Radioengineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.  
E-mail: ek.genia13@gmail.com

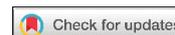
Sergey V. Kozlov, D. Sc. (Eng.), Prof., Prof. at the Information Radioengineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.  
E-mail: kozlov@bsuir.by

Irina E. Savinykh, Software Engineer, Laboratory of Self-organization System Modeling, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.  
E-mail: rct.savinykh@gmail.com

Aliaksandr S. Shapkin, Postgraduate Student, Laboratory of Self-organization System Modeling, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.  
E-mail: shap1kin2@gmail.com

# ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

## SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION



УДК 004.89  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-37-49>

Оригинальная статья  
Original Paper

## Распознавание состава ткани предметов одежды на изображении в сфере электронной коммерции с использованием нейронных сетей

**В. В. Сорокина**

*Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, Минск, 220050, Беларусь  
E-mail: viktoria.sorokina.96@gmail.com*

### Аннотация

**Цели.** Поставлена цель разработать новый подход к распознаванию состава ткани предметов одежды на изображении в сфере электронной коммерции путем использования генеративно-сопоставительной сети для создания синтетических изображений предметов одежды с известным составом ткани, используемых затем для обучения сверточной нейронной сети при классификации состава ткани реальных изображений одежды. Вместо классического изображения предмета одежды генерируется копия, у которой материал увеличен до волокон и структуры ткани.

**Методы.** Основными методами распознавания состава ткани предметов одежды на изображении в сфере электронной коммерции являются создание и аннотация наборов данных для обучения нейронных сетей, синтез изображений ткани предметов одежды, выбор архитектуры и ее модификация, валидация и проведение тестов, а также интерпретация результатов.

**Результаты.** Результаты экспериментов, проведенных с помощью предложенного подхода, показывают его эффективность при точном определении состава ткани предметов одежды в сфере электронной коммерции, что позволяет использовать данный метод для улучшения поиска и просмотра на веб-сайтах.

**Заключение.** При помощи генеративно-сопоставительной сети был синтезирован набор данных товаров электронной коммерции, произведена его аннотация, построены нейронные сети для распознавания состава ткани предметов одежды, проведено сравнение результатов. Результаты исследования показали, что новый подход для распознавания ткани предметов одежды обладает высокой точностью в сравнении с уже известными методами. Дополнительное использование модели внимания также дает хорошие результаты, что отражается в улучшении метрик.

**Ключевые слова:** классификация состава ткани, генеративно-сопоставительная сеть, сверточная нейронная сеть, электронная коммерция, синтез изображений, модель внимания

Для цитирования. Сорокина, В. В. Распознавание состава ткани предметов одежды на изображении в сфере электронной коммерции с использованием нейронных сетей / В. В. Сорокина // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 37–49. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-37-49>

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 27.02.2023

Подписана в печать | Accepted 06.04.2023

Опубликована | Published 29.09.2023

---

---

## Recognition of fabric composition of clothing in an image in e-commerce using neural networks

Viktoriya V. Sorokina

Belarusian State University,  
av. Nezavisimosti, 4, Minsk, 220050, Belarus  
E-mail: [viktoriya.sorokina.96@gmail.com](mailto:viktoriya.sorokina.96@gmail.com)

### Abstract

**Objectives.** Development of new approach for recognizing the fabric composition of clothing in e-commerce images by using generative adversarial network (GAN) to generate synthetic images of clothing with known fabric composition, to be used to train the CNN to classify the fabric composition of real clothing images. Instead of a classic clothing image, a copy is generated with the material zoomed to fibers and fabric structure.

**Methods.** The main methods to recognize the fabric composition of the clothing image in the e-commerce are the creation and annotation of a dataset for the neural network training, synthesis of the fabric of clothing, the choice of architecture and its modification, validation and testing, and interpretation of the results.

**Results.** Experimental results with the constructed method show that it is effective for accurately recognizing the fabric composition of e-commerce clothing to be used to improve search and browsing on websites.

**Conclusion.** In the course of the experiment, using a generative adversarial network, a data set of e-commerce products was synthesized and annotated, neural networks were built to recognize the composition of the fabric of clothing items. The results of the study showed that the new approach for recognizing the fabric of clothing provides higher accuracy in comparison with already known methods, in addition, the use of the attention model also gives good results to improve the metrics.

**Keywords:** classification of fabric composition, generative adversarial network, convolutional neural network, e-commerce, image synthesis, attention model

**For citation.** Sorokina V. V. *Recognition of fabric composition of clothing in an image in e-commerce using neural networks*. Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 37–49 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-37-49>

**Conflict of interest.** The author declares of no conflict of interest.

**Введение.** В последние годы можно наблюдать значительный рост популярности интернет-магазинов, что влечет за собой и быстрое развитие индустрии одежды в сфере электронной коммерции. Между тем одной из основных проблем при покупках одежды в онлайн-магазинах является отсутствие возможности потрогать одежду, что затрудняет для покупателей определение состава ее ткани. Состав ткани – важный фактор для многих потребителей при совершении покупок, так как он влияет на долговечность, комфорт и уход за одеждой.

Очень часто онлайн-площадки, где множество продавцов представляют свой товар, не имеют унифицированного стандарта описания товара, поэтому состав ткани предмета одежды может отсутствовать. Процесс подготовки полноценного описания является трудозатратной задачей, включающей в себя наличие физического предмета одежды и соответствующего специалиста для определения свойств ткани и ее классификации. Настоящая работа направлена на автоматизацию этого процесса без привлечения человеческих ресурсов для детального представления товара.

Классификация изображений – одна из важных задач компьютерного зрения, которая включает в себя присвоение метки или класса изображению на основе его визуального содержимого. Целью данной задачи является точное определение объектов или сцен, присутствующих на изображении. Процесс классификации изображений обычно включает следующие этапы:

- сбор и аннотирование набора данных изображений, где каждое изображение помечено соответствующим классом или меткой;
- обучение модели, например сверточной нейронной сети (Convolutional Neural Network, CNN), на аннотированном наборе данных;
- использование обученной модели для классификации новых изображений путем присвоения им метки на основе прогнозов модели.

Решение задачи классификации тканей предполагает присвоение метки класса образцу ткани, но из-за специфики изображений выделить такой образец ткани, чтобы классификация была точной, почти невозможно. При этом определение состава ткани по входным изображениям тканевых поверхностей является более простой задачей. Так, например, трикотажные и вязаные ткани легко отличить друг от друга. Петлевая структура трикотажных тканей и переплетение основных и уточных нитей на тканых материалах позволяют легко идентифицировать две структуры.

Цель исследования – повысить точность классификации тканей предметов одежды на изображении, что является важной задачей в индустрии моды и текстиля. Традиционно классификация тканей проводилась путем изучения характеристик изображения предметов одежды, т. е. самой структуры ткани. Однако этот метод затруднителен, если изображения низкого качества или сняты с большого расстояния. В таких случаях существующие подходы могут быть недостаточно точными для классификации тканей только на основе характеристик изображения.

Предлагаемое в статье решение состоит в том, чтобы при классификации тканей сместить акцент с характеристик изображения на структуру ткани, вместо изучения особенностей изображения предмета одежды сосредоточиться на выявлении внутренней структуры самой ткани. С помощью данного подхода можно достичь более высокого уровня точности в классификации тканей даже в тех случаях, когда элементы изображения трудно различимы.

Подход включает использование такого передового метода анализа изображений, как CNN, для выявления и анализа структурных особенностей тканей на изображениях. Этот метод может помочь системе распознать уникальные узоры и текстуры, характерные для различных типов тканей, и использовать данную информацию для их точной классификации. Важно, имея изображение предмета одежды на снимке низкого качества или снятого с большого расстояния, распознать состав ткани путем генерации образца ткани, отображающего его структуру.

В работе предлагается новый подход для определения состава ткани предметов одежды в сфере электронной коммерции, основанный на комбинации генеративно-состязательной сети (Generative Adversarial Network, GAN) и CNN, основная идея которого заключается в замене исходного материала предмета одежды его детализированной версией для более точной классификации и упрощения модели.

Основной вклад автора в решение поставленной задачи заключается в следующем:

- разработка нового подхода к определению состава ткани при помощи условных генеративно-состязательных сетей;
- представление самой задачи классификации как простой структуры, достаточной для получения результатов высокой точности (модификация нейросети VGG-19 с помощью модели внимания [1]);
- ускорение обучения GAN за счет использования архитектуры U-Net [2] в генераторе.

**1. Анализ существующих подходов.** Классификация тканей важна в таких отраслях, как текстильная промышленность, индустрия моды и электронная коммерция, где необходимо классифицировать различные типы тканей на основе их визуальных характеристик. Она может включать определение типа ткани (например, хлопок, полиэстер, шелк и т. д.), рисунка переплетения (саржа, атлас и т. д.), текстуры (гладкая, грубая и т. д.) или других параметров по ви-

зуальным свойствам. Задача классификации может быть решена с помощью методов на основе анализа изображений, где в качестве входных данных используются изображения тканей, а классификатор обучается распознавать различные типы тканей по их визуальным характеристикам. Кроме того, задача классификации может быть с учителем [3, 4], когда модель обучается на размеченном наборе данных изображений ткани, или без учителя [5], когда обучение осуществляется на неразмеченном наборе данных и необходимо изучать особенности тканей.

В публикации [3] для определения тканей авторы использовали как текстурные признаки, так и цветовые признаки HSV (Hue, Saturation, Value). В работе [4] предложен метод, сочетающий цветовые моменты и так называемые признаки GIST для классификации 700 изображений тканей. В статье [5] представлен алгоритм сопоставления изображений ткани путем создания набора визуальных слоев с использованием алгоритма  $k$ -средних. Общая проблема указанных методов заключается в том, что они разрабатывались и тестировались на наборе данных небольшого размера и это повлияло на их точность. В работе [6] авторам удалось добиться высокой точности за счет использования обучающего набора данных, включающего около 10 000 образцов ткани, и CNN с функцией потерь *Center Loss*.

В перечисленных выше работах применяются схожие подходы для решения задач классификации и идентификации тканей. Однако все они базируются на таком определении тканей, когда в качестве входного изображения используются образцы ткани, т. е. изображение, отображающее детализированные структурные детали.

В настоящей статье для генерации более детализированного изображения материала ткани используется сеть  $pix2pix$ , которая относится к классу условных генеративно-сопоставительных сетей cGAN, а для классификации полученных образцов ткани – CNN VGG-19, модифицированная моделью внимания. Основная идея работы заключается в том, чтобы при классификации тканей перейти от определения материала предмета одежды (например, хлопка) на изображениях, где структура ткани не видна, к определению типа ткани из ее структуры, а затем решить задачу классификации при помощи CNN. Поставлена цель построить алгоритм, способный по классическому изображению предмета одежды в каталоге товаров электронной коммерции определить его состав.

**2. Предлагаемый метод.** Алгоритм определения состава ткани предметов одежды изображен на рис. 1, схема последовательности блоков алгоритма – на рис. 2.



Рис. 1. Алгоритм определения состава ткани

Fig. 1. Algorithm of fabric composition recognition



Рис. 2. Схема последовательности блоков алгоритма

Fig. 2. Scheme of algorithm's blocks sequence

В работе используются три нейронные сети. Хотя можно объединить модели pix2pix и VGG-19 в единую архитектуру, есть несколько причин, по которым в этом исследовании они применяются по отдельности.

Во-первых, сеть pix2pix предназначена для преобразования изображения в изображение, в частности для создания высококачественных изображений из входных данных. Объединение задачи, выполняемой сетью pix2pix, с задачей классификации ткани может быть неоптимальным, поскольку при этом не используется вся мощь архитектуры модели.

Модель VGG-19 представляет собой хорошо зарекомендовавшую себя архитектуру для решения задач классификации изображений и успешно используется во многих приложениях. В рамках данного исследования модификация ее с помощью модели внимания показала, что модель VGG-19 может лучше выделять важные функции и отфильтровывать шум. Это приводит к более точной классификации.

Во-вторых, использование отдельных моделей обеспечивает бóльшую гибкость и модульность алгоритма. В дальнейшем в случае построения более эффективной модели для создания изображений или решения задачи классификации ее можно легко заменить, не затрагивая другую часть алгоритма.

Наконец, разделение моделей также упрощает интерпретацию и отладку алгоритма. Если есть проблемы с генерацией или классификацией изображений, проще изолировать источник проблемы и устранить его, не внося изменений в другую часть алгоритма.

Рассмотрим каждый этап алгоритма:

**Сегментация.** Для повышения точности представленного в статье метода можно предварительно сегментировать изображение, чтобы отделить передний план (т. е. сам объект) от фона. Для этого использовалась созданная и описанная автором в работе [7] модель на основе CNN YOLACT и стандартизации весов.

**Генерация карты текстуры.** Задача генерации карты текстуры заключается в создании более детализированного изображения материала ткани на основе классического изображения товара. Входное и выходное изображения алгоритма генерации карты текстуры показаны на рис. 3.



Рис. 3. Примеры изображений модуля генерации карты текстуры: *a)* входное; *b)* выходное  
*Fig. 3. Examples of image of texture map generation module: a) input; b) output*

Для решения задачи использовалась генеративно-состязательная сеть, для которой был необходим соответствующий набор данных для обучения. Построение набора данных для обучения и самой модели описано в разд. 3.

*Выделение образца ткани.* Задача выделения образца ткани представляет собой генерацию изображения размером  $50 \times 50$  пикселей, которое отображает текстуру ткани. Для решения этой задачи следует определить доминантный цвет материала, на основе которого выделяется соответствующий фрагмент из исходного изображения предмета одежды в сфере электронной коммерции. Входное и выходное изображения алгоритма выделения образца ткани показаны на рис. 4.



Рис. 4. Примеры изображений модуля выделения образца ткани: *a)* входное; *b)* выходное  
*Fig. 4. Examples of image of tissue sampling module: a) input; b) output*

*Классификация образца ткани.* Задача классификации образца ткани направлена на распознавание одного из 10 типов тканей предметов одежды (хлопок, шерсть, эластан и др.) в сфере электронной коммерции. На вход алгоритма поступает изображение образца ткани, на выход –

соответствующая метка материала. Для решения задачи был подготовлен набор данных для обучения, а также построена CNN. Вход и выход алгоритма представлены на рис. 5.



Рис. 5. Пример входа и выхода алгоритма классификации образца  
 Fig. 5. Example of input and output of sample classification

**3. Обучающее множество: синтез и основные характеристики.** Для построения методов генерации карты текстуры и классификации образца ткани необходимы наборы данных для обучения. Набор данных для задачи генерации карты текстуры представляет собой оригинальное изображение в паре с изображением с более детализированным материалом предмета одежды. Набор данных для классификации образца – изображение образца ткани и соответствующая ему метка класса.

**3.1. Синтез изображений для обучающего множества.** Поскольку задачу определения состава ткани с помощью комбинации GAN и CNN до этого не решали, необходимо было создать набор данных для обучения, который включал бы исходное изображение предмета одежды и изображение с детализированным материалом ткани. Процесс ручного создания такого набора является трудозатратным, поэтому было принято решение синтезировать его автоматически. Для этого использовалась база изображений образцов тканей с открытым исходным кодом, которая создавалась специально для решения задачи классификации образцов в исследовании [8], а также набор данных предметов одежды, разбитый на четыре класса, вместе с соответствующими бинарными масками, где 255 – объект, 0 – фон. Представленные классы:

- 1) майки (рубашки);
- 2) платья;
- 3) брюки;
- 4) юбки.

Примеры образца ткани и предмета одежды показаны соответственно на рис. 6 и 7.

Образцы тканей также были разделены на классы в соответствии с типом одежды и материалом (например, юбка-синтетика-85-хлопок-15).

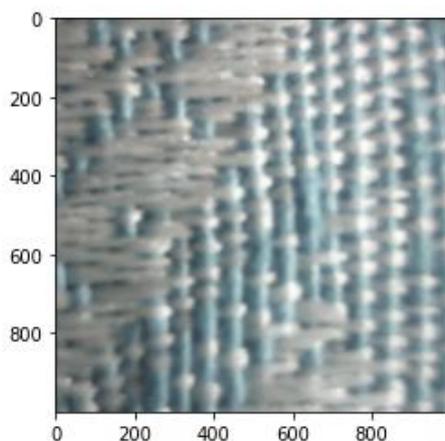


Рис. 6. Образец ткани  
 Fig. 6. Sample of fabric

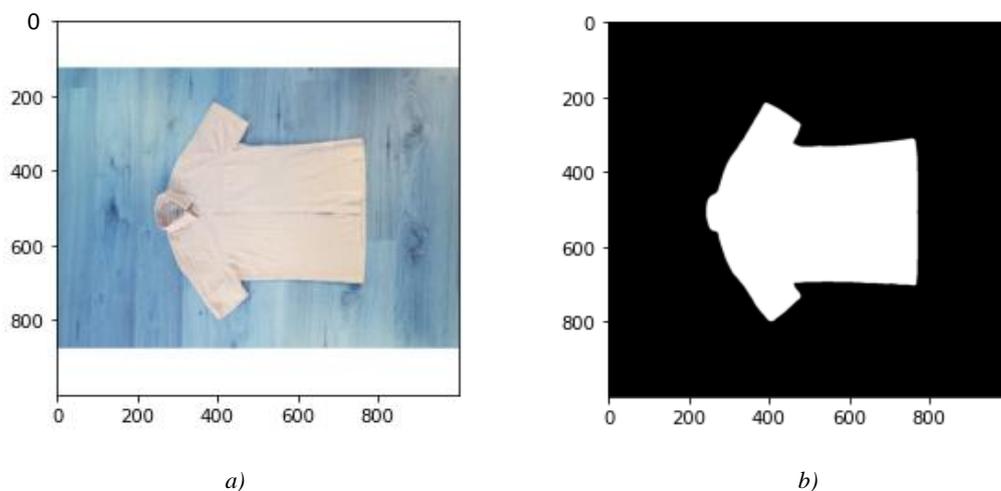


Рис. 7. Предмет одежды (a) и его бинарная маска (b)  
Fig. 7. Clothing item (a) and its binary mask (b)

Чтобы автоматически синтезировать набор данных, для каждого предмета одежды выбирался соответствующий классу данного предмета материал, определялся доминантный цвет предмета одежды и материал окрашивался в этот цвет.

### 3.2. Алгоритм определения доминантного цвета.

Вход: сегментированное RGB-изображение.

Используется метод  $k$ -means – алгоритм обучения без учителя для кластеризации данных в  $K$  кластеров. Идея метода заключается в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек кластеров от центров этих кластеров.

Алгоритм  $k$ -means для определения доминирующего цвета включает в себя следующие шаги:

1. Преобразование изображения в двумерный массив, где каждая строка представляет пиксел изображения.
2. Инициализация  $K$  центроидов кластеров случайным образом.
3. Итерация по всем пикселям изображения и назначение каждому пикселу его ближайшего центроида на основе евклидова расстояния между пикселом и центроидом.
4. Пересчет позиции  $K$  центроидов через среднее значение всех пикселей, назначенных каждому из этих кластеров.
5. Повтор шагов 3 и 4 до тех пор, пока центроиды не перестанут меняться или не будет достигнуто максимальное количество итераций.
6. Сопоставление каждого пикселя изображения с его ближайшим центроидом.

Конечным результатом является определение  $K$  доминирующих цветов в изображении, представленных  $K$  центроидами кластеров.

Выход: доминантный цвет товара в формате RGB.

При помощи синтеза изображений был создан набор данных, включающий 3938 RGB-изображений размером  $800 \times 800$  пикселей, из которых в обучающей выборке было 2355 изображений, в валидационной – 1299 и в тестовой – 284.

**4. Генерация карты текстуры.** Для решения задачи необходимо было выбрать нейросеть, способную генерировать высококачественные снимки, неотличимые от реальных. Была выбрана архитектура pix2pix [9].

Сеть pix2pix, также известная как Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, представляет собой тип условной GAN, который используется для задач преобразования изображения в изображение. Она состоит из двух основных компонентов: генератора и дискриминатора. Генератор принимает входное изображение и генерирует выходное, в то время как дискриминатор принимает как входное изображение, так и сгенерированное выходное изображение и решает, является выходное изображение реальным или поддельным. Гене-

ратор и дискриминатор обучаются путем состязания: генератор пытается генерировать изображения, которые могут обмануть дискриминатор, а дискриминатор пытается правильно идентифицировать настоящие и поддельные изображения. Математически это можно выразить следующим образом: пусть дано входное изображение  $x$ , выходное  $y$  и вектор шума  $z$ . Тогда отображение  $G: \{x, z\} \rightarrow y$  задает генератор  $G$ , который будет оцениваться дискриминатором  $D$ .

Основными преимуществами pix2pix являются:

1. Высококачественные изображения: сеть pix2pix известна созданием высококачественных изображений, неотличимых от реальных.
2. Универсальность: сети pix2pix можно использовать для широкого спектра задач преобразования изображения в изображение, таких как перенос стиля, преобразование объектов и дорисовка изображения.
3. Условная генерация: сеть pix2pix можно использовать для условной генерации изображений, когда выходное изображение создается на основе определенного условия или ввода.
4. Обработка структурированных данных: сеть pix2pix может обрабатывать структурированные данные, такие как карты и рисунки.
5. Обработка отсутствующих данных: сеть pix2pix может обрабатывать отсутствующие данные и дорисовывать изображение.

В настоящей работе для улучшения работы генератора вместо классического подхода encoder-decoder, в котором входные данные проходят через серию слоев, постепенно понижающих дискретизацию, до слоя узкого места (bottleneck), после чего процесс меняется на обратный (такая сеть требует, чтобы весь информационный поток проходил через все слои, включая bottleneck), использовалась архитектура U-Net (рис. 8). В частности, добавлялись пропущенные соединения между каждым слоем  $i$  и слоем  $n - i$ , где  $n$  – общее количество слоев. Каждое соединение с пропуском просто объединяет все каналы на уровне  $i$  с каналами на уровне  $n - i$ .

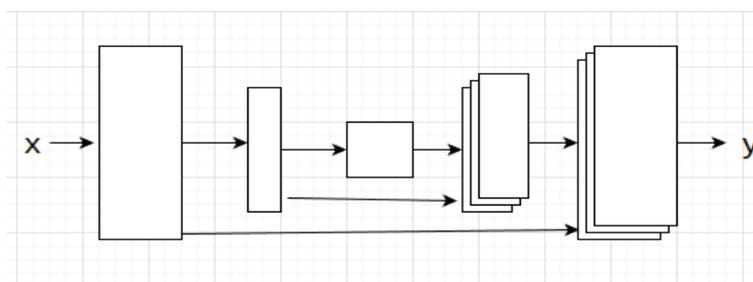


Рис. 8. Архитектура генератора  
 Fig. 8. Generator architecture

Обучение сети pix2pix с сетью U-Net в качестве генератора проводилось с использованием фреймворка PyTorch с видеокартой GPU NVIDIA T4, размер пакета (*batch\_size*) – 2, количество эпох – 50, архитектура генератора – U-Net 256.

**5. Выделение и классификация образца ткани.** Следующий шаг после генерации карты текстур – это выделение образца ткани и его дальнейшая классификация. Выделение образца ткани осуществлялось при помощи алгоритма определения доминантного цвета с переходом в цветовое пространство LAB путем задания размера блоков, содержащих доминантный цвет. Выход алгоритма – изображение 50×50 пикселей, содержащее структуру ткани.

Для классификации образца ткани была построена модель на основе VGG-19 [10] и модели внимания [11] по аналогии с работой [12].

Общая структура сети VGG-19 с моделью внимания показана на рис. 9. Для предотвращения переобучения и улучшения способности модели к обобщению была использована предобученная сеть VGG-19 с удаленными полносвязными слоями. Блоки внимания добавлены соответственно после третьего, четвертого и пятого слоев Pooling сети VGG-19. Наконец, выходные данные трех блоков внимания объединяются вместе, чтобы сформировать окончательный вектор признаков.

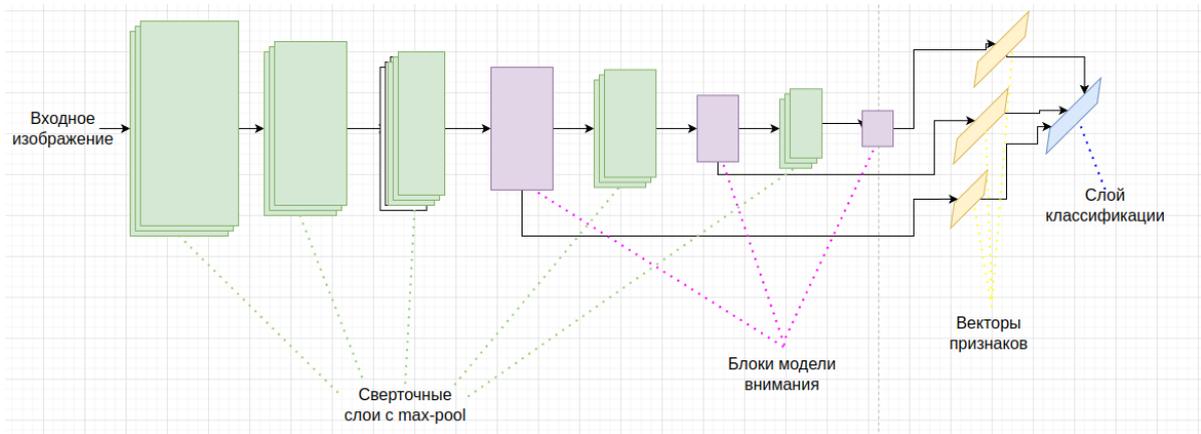


Рис. 9. Архитектура модели классификации

Fig. 9. Classification model architecture

Входом блока внимания является промежуточный признак  $F(C \times H \times W)$  сети VGG-19, где  $F$  представляет собой промежуточный признак (feature map) размерности  $C \times H \times W$ , полученный из слоя сети VGG-19 ( $C$  обозначает количество каналов (или признаков),  $H$  – высоту, а  $W$  – ширину этого признака.). На первом шаге пространственный модуль в блоке внимания генерирует пространственную карту внимания  $M_S(1 \times H \times W)$ . Далее  $M_S$  умножается на промежуточный признак  $F$ , чтобы получить пространственно уточненный признак  $F'$ . Затем в блоке внимания генерируется карта внимания канала  $M_C(C \times 1 \times 1)$  путем умножения  $M_C$  на  $F'$ , чтобы получить окончательный уточненный признак  $F''$ . Таким образом, процесс расчета в блоке внимания можно представить следующим образом:

$$F' = M_S(F) \cdot F, F'' = M_C(F) \cdot F',$$

где знак  $\cdot$  обозначает поэлементное умножение.

Модель обучалась в течение 100 эпох с использованием фреймворка PyTorch с видеокартой GPU NVIDIA T4.

**6. Результаты работы алгоритмов.** Для классификации обучались три сети: классическая VGG-19, VGG-19 с моделью внимания и VGG-19 с моделью внимания и сетью pix2pix. Обучение было направлено на распознавание 10 типов тканей предметов одежды в сфере электронной коммерции. Для обучения применялась видеокарта GPU NVIDIA T4. В качестве метрик оценки моделей использовались Precision, Recall и F1-score.

Примеры генерации карт текстуры и дальнейшей их классификации приведены на рис. 10. Точность классификации представлена в таблице.

Средняя точность классификации обученных сетей  
Average classification result of the trained neural networks

Сеть Network	Метрика Metrics		
	Precision	Recall	F1-score
VGG-19	0,68	0,75	0,71
VGG-19 с моделью внимания	0,73	0,84	0,78
VGG-19 с моделью внимания и сетью Pix2pix	0,97	0,95	0,95

Результатом применения модели внимания стало увеличение скорости обучения нейронной сети. Для получения равнозначных со стандартной сетью VGG-19 результатов понадобилось в 2,5 раза меньше итераций при обучении.

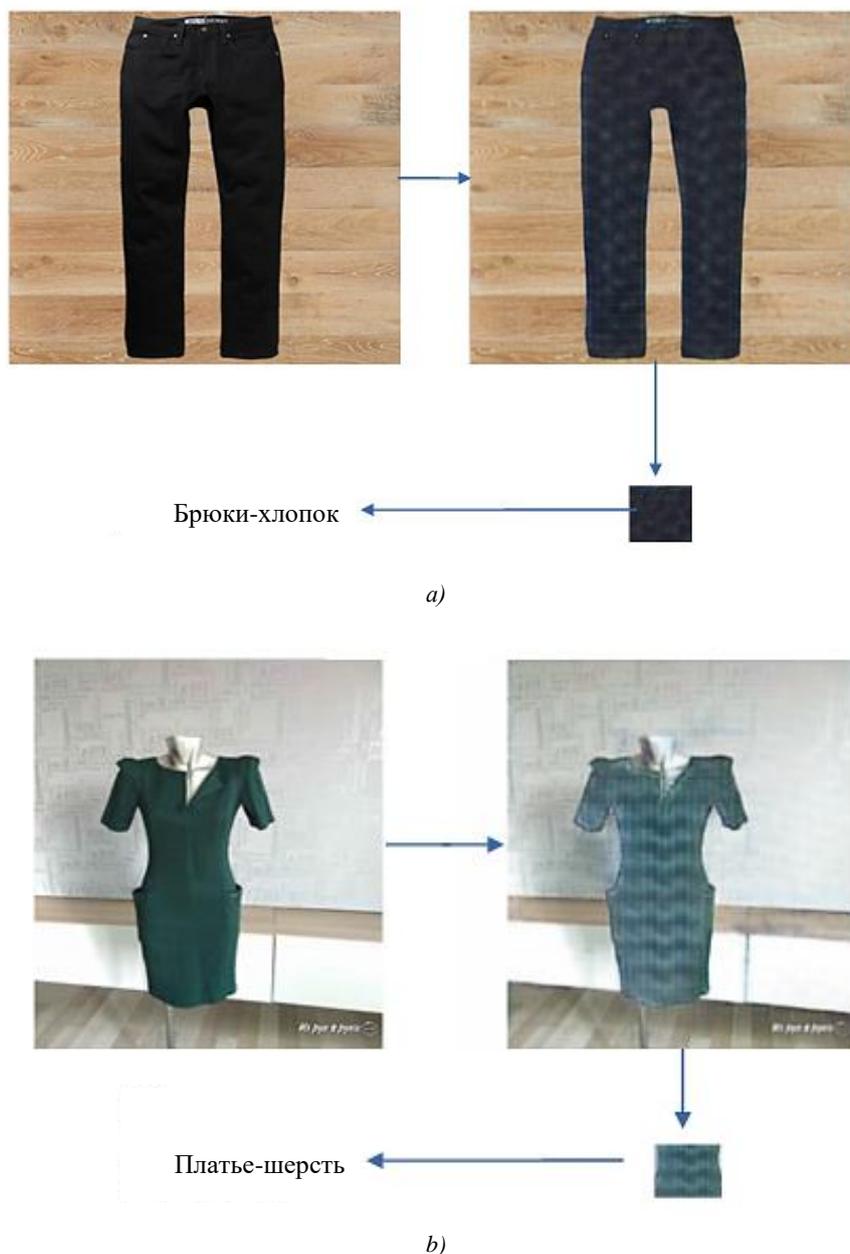


Рис. 10. Результаты работы алгоритма на примере предмета одежды «брюки» (a) и «платье» (b)  
Fig. 10. The results of the algorithm on the example of the item of clothing "trousers" (a) and "dress" (b)

Результаты экспериментов показали, что построенная модель обладает хорошими свойствами: стабильностью, более быстрой сходимостью и высокой точностью. Тем не менее можно выделить следующие направления для дальнейших исследований:

1. Генерация и классификация комбинированных материалов.
2. Решение проблемы объема данных. (Метод может не идентифицировать ткани, которые не включены в синтетические изображения, но присутствуют в изображениях реального мира.)
3. Создание единой модели, осуществляющей как генерацию, так и последующую классификацию образца ткани.

Возможным путем решения проблемы комбинированных материалов является их предварительная сегментация, проблема объема данных решается за счет расширения обучающей выборки.

На текущий момент создание единой модели для генерации и классификации образца ткани ограничено двумя факторами:

– недостаточностью вычислительной мощности для обучения, так как описанная архитектура классификатора с моделью внимания при встраивании в генеративно-состязательную сеть на этапе обучения требует увеличения видеопамяти RAM GPU в несколько раз;

– невозможностью достичь того же уровня точности при использовании более простой модели классификации.

**Заключение.** В ходе исследования был подготовлен набор данных путем автоматического синтеза, произведена его аннотация, построены три сети VGG-19: классическая, с использованием модели внимания и сети pix2pix. Данные модели были обучены на построенном наборе данных, проведены валидация и тестирование. Установлено, что переход от классического изображения предмета одежды к структуре ткани значительно повышает точность модели. Модель внимания позволяет сети лучше сосредоточиться на признаках объекта, что влияет на качество обученной сети и скорость сходимости.

Было выявлено, что использование архитектуры U-Net в качестве основы для генератора сети pix2pix позволяет ускорить модель и помогает ей обойти слой узкого места (bottleneck).

Предложенный метод может быть применен и к другим архитектурам нейронных сетей, а также использован для решения задачи регрессии, когда необходимо установить процентный состав материала.

#### Список использованных источников

1. Сорокина, В. В. Выделение отдельных участков тела человека на изображении с использованием нейронных сетей и модели внимания / В. В. Сорокина, С. В. Абламейко // Журнал Бел. гос. ун-та. Математика. Информатика. – 2022. – № 2. – С. 94–106.

2. Ronneberger, O. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronnenberger, P. Fischer, T. Brox // 18th Intern. Conf. on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI 2015, Munich, Germany, 5–9 Oct. 2015. – Munich, 2015. – Part III. – P. 234–241. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28)

3. Suciati, N. Fractal-based texture and HSV color features for fabric image retrieval / N. Suciati, D. Herumurti, A. Y. Wijaya // 5th IEEE Intern. Conf. on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2015, Batu Ferringhi, Penang, Malaysia, 27–29 Nov. 2015. – Batu Ferringhi, 2015. – P. 178–182.

4. A new method of printed fabric image retrieval based on color moments and gist feature description / J. Jing [et al.] // Textile Research J. – 2016. – Vol. 86, iss. 11. – P. 1137–1150. <https://doi.org/10.1177/0040517515606378>

5. SKL algorithm based fabric image matching and retrieval / Y. Cao [et al.] // Ninth Intern. Conf. on Digital Image Processing (ICDIP 2017), Hong Kong, China, 19–22 May 2017. – Hong Kong, 2017. – Vol. 10420. – P. 104201F.

6. Wang, X. Fabric identification using convolutional neural network / X. Wang, G. Wu, Y. Zhong // Artificial Intelligence on Fashion and Textiles : Proceedings of the Artificial Intelligence on Fashion and Textiles (AIFT) Conf. 2018, Hong Kong, 3–6 July 2018. – Hong Kong, 2018. – P. 93–100. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99695-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99695-0_12)

7. Sorokina, V. Neural network training acceleration by weight standardization in segmentation of electronic commerce images / V. Sorokina, S. Ablameyko // Studies in Computational Intelligence. – 2020. – Vol. 976. – P. 237–244.

8. Fine-grained material classification using micro-geometry and reflectance / C. Kampouris [et al.] // 14th European Conf. on Computer Vision, Amsterdam, the Netherlands, 11–14 Oct. 2016. – Amsterdam, 2016. – Part V. – P. 778–792.

9. Image-to-image translation with conditional adversarial networks / P. Isola [et al.] // 2017 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017. – Honolulu, 2017. – P. 1125–1134.

10. Simonyan, K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition / K. Simonyan, A. Zisserman // Intern. Conf. on Learning Representations, San Diego, 7–9 May 2015. – San Diego, 2015. – P. 1137–1149.

11. Bahdanau, D. Neural machine translation by jointly learning to align and translate / D. Bahdanau, K. Cho, Y. Bengio // 3rd Intern. Conf. on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, 7–9 May 2015. – San Diego, 2015.

12. Sorokina, V. Extraction of human body parts from the image using convolutional neural network and attention mode / V. Sorokina, S. Ablameyko // Proc. of 15th Intern. Conf. "Pattern Recognition and Information Processing". – Minsk : UIIP NASB, 2021. – P. 84–88.

---

---

## References

1. Sorokina V., Ablameyko S. *Selection of individual parts of the human body in the image using neural networks and the attention model*. Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Informatika [Journal of the Belarusian State University. Mathematics. Computer Science], 2022, no. 2, pp. 94–106.

2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. *18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI 2015, Munich, Germany, 5–9 October 2015*. Munich, 2015, part III, pp. 234–241. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28)

3. Suciati N., Herumurti D., Wijaya A. Y. Fractal-based texture and HSV color features for fabric image retrieval. *5th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2015, Batu Ferringhi, Penang, Malaysia, 27–29 November 2015*. Batu Ferringhi, 2015, pp. 178–182.

4. Jing J., Li Q., Li P., Zhang L. A new method of printed fabric image retrieval based on color moments and gist feature description. *Textile Research Journal*, 2016, vol. 86, iss. 11, pp. 1137–1150. <https://doi.org/10.1177/0040517515606378>

5. Cao Y., Zhang X., Ma G., Sun R., Dong D. SKL algorithm based fabric image matching and retrieval. *Ninth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2017), Hong Kong, China, 19–22 May 2017*. Hong Kong, 2017, vol. 10420, p. 104201F.

6. Wang X., Wu G., Zhong Y. Fabric identification using convolutional neural network. *Artificial Intelligence on Fashion and Textiles : Proceedings of the Artificial Intelligence on Fashion and Textiles (AIFT) Conference 2018, Hong Kong, 3–6 July 2018*. Hong Kong, 2018, pp. 93–100. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99695-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99695-0_12)

7. Sorokina V., Ablameyko S. Neural network training acceleration by weight standardization in segmentation of electronic commerce images. *Studies in Computational Intelligence*, 2020, vol. 976, pp. 237–244.

8. Kampouris C., Zafeiriou S., Ghosh A., Malassiotis S. Fine-grained material classification using micro-geometry and reflectance. *14th European Conference on Computer Vision, Amsterdam, the Netherlands, 11–14 October 2016*. Amsterdam, 2016, part V, pp. 778–792.

9. Isola P., Zhu J.-Y., Zhou T., Efros A. A. Image-to-image translation with conditional adversarial networks. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017*. Honolulu, 2017, pp. 1125–1134.

10. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *International Conference on Learning Representations, San Diego, 7–9 May 2015*. San Diego, 2015, pp. 1137–1149.

11. Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, 7–9 May 2015*. San Diego, 2015.

12. Sorokina V., Ablameyko S. Extraction of human body parts from the image using convolutional neural network and attention mode. *Proceedings of 15th International Conference "Pattern Recognition and Information Processing"*. Minsk, UIIP NASB, 2021, pp. 84–88.

## Информация об авторе

Сорокина Виктория Вадимовна, аспирант кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования механико-математического факультета, Белорусский государственный университет.  
<https://orcid.org/0000-0002-2128-1943>

## Information about the author

Viktoria V. Sorokina, Postgraduate Student of web-Technologies and Computer Modeling Department of Mechanics and Mathematics Faculty, Belarusian State University.  
<https://orcid.org/0000-0002-2128-1943>

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

## MATHEMATICAL MODELING



УДК 519.872  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-50-60>

*Оригинальная статья*  
*Original Paper*

## Характеристики производительности системы массового обслуживания с расщеплением запросов

**В. И. Клименок**

*Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь  
E-mail: klimenok@bsu.by*

### Аннотация

**Цели.** Рассматривается задача построения и исследования математической модели стохастической системы с расщеплением и сборкой запросов. Требуется построить процесс функционирования системы, найти условие существования стационарного распределения, предложить алгоритмы его вычисления и основных стационарных характеристик производительности системы. Особый интерес вызывает задача получения нижней и верхней границ математического ожидания времени пребывания запроса в системе. **Методы.** Используются методы теории вероятностей, теории массового обслуживания и теории матриц. **Результаты.** Функционирование системы описано в терминах многомерной цепи Маркова. Найдено конструктивное условие существования стационарного распределения, предложены алгоритмы его вычисления и стационарных характеристик производительности системы. Получены аналитические выражения для нижней и верхней границ математического ожидания времени пребывания запросов в системе.

**Заключение.** Исследован стационарный режим функционирования системы массового обслуживания с расщеплением и сборкой запросов, поступающих в систему в стационарном пуассоновском потоке. Каждый из поступающих запросов расщепляется на два задания, которые идут в две подсистемы, состоящие из обслуживающего прибора и буфера. Времена обслуживания заданий имеют разные фазовые распределения (*PH-Phase type distributions*). Для данной системы найдено условие существования стационарного распределения, предложены алгоритмы вычисления стационарного распределения и ряда стационарных характеристик производительности системы. Получены аналитические выражения для нижней и верхней границ математического ожидания времени пребывания запроса в системе от момента его поступления в систему до момента синхронизации, которое является критическим показателем производительности системы с расщеплением и сборкой запросов.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания с расщеплением и сборкой запросов (англ. fork-join queue), стационарный пуассоновский поток, фазовое распределение времени обслуживания, стационарные характеристики производительности, границы для среднего времени пребывания

Для цитирования. Клименок, В. И. Характеристики производительности системы массового обслуживания с расщеплением запросов / В. И. Клименок // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 50–60. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-50-60>

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 17.03.2023

Подписана в печать | Accepted 15.05.2023

Опубликована | Published 29.09.2023

---

---

## Performance characteristics of the fork-join queuing system

Valentina I. Klimenok

Belarusian State University,  
av. Nezavisimosti, 4, Minsk, 220030, Belarus  
E-mail: [klimenok@bsu.by](mailto:klimenok@bsu.by)

### Abstract

**Objectives.** The problem of investigating a fork-join queuing system is considered. It is required to build the process of the system functioning, to find the condition for the existence of a stationary distribution, and propose algorithms for calculating the stationary distribution and the main stationary performance characteristics. The special interest of the study is to obtain the lower and upper bounds of the mean sojourn time of a customer in the system.

**Methods.** Methods of probability theory, queuing theory and matrix theory are used.

**Results.** The functioning of the system is described in terms of a multidimensional Markov chain. A constructive condition for the existence of a stationary distribution is found, and algorithms for calculating the stationary distribution and stationary performance characteristics of the system are proposed. Analytical expressions are obtained for the lower and upper bounds of the mean sojourn time of customers in the system.

**Conclusion.** The functioning of the fork-join queuing system with a stationary Poisson flow has been studied. Each of the arriving customers forks into two tasks that go to two subsystems, each of which consists of a server and a buffer. We assume that the buffer to one of the servers is unlimited, and to the second server has a finite volume. Service times have, generally speaking, different phase distributions (*PH*-Phase type distributions). For this system, a condition for the existence of a stationary distribution is obtained, algorithms for calculating the stationary distribution and a number of stationary performance measures of the system are proposed. Analytical expressions for the lower and upper bounds of the mean sojourn time of a customer in the system from the moment it enters the system to the moment of synchronization, which is a critical performance indicator of the fork-join queues, are obtained. The results of the study can be used for modeling various computer and communication systems, in particular, systems that perform parallel computing, customer processing in distributed databases, and parallel disk access.

**Keywords:** fork-join queuing system, stationary Poisson flow, phase-type distribution of service times, stationary performance measures, bounds for the mean sojourn time

**For citation.** Klimenok V. I. *Performance characteristics of the fork-join queuing system*. *Informatika [Informatics]*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 50–60 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-50-60>

**Conflict of interest.** The author declares of no conflict of interest.

**Введение.** Системы массового обслуживания с разделением и повторной синхронизацией данных (общепринятое в мировой литературе название fork-join-системы) являются естественными моделями различных компьютерных и коммуникационных систем, в частности систем, в которых выполняются параллельные вычисления, обработка запросов в распределенных базах данных и параллельный доступ к диску. Ключевая особенность этих систем заключается

в том, что после поступления запроса в систему он разделяется на  $K$  заданий, которые выполняются  $K$  параллельными обслуживающими приборами. Запрос считается обслуженным, когда все его задания выполнены. В этот момент (момент синхронизации) осуществляется сборка запроса из заданий и уход из системы.

Критическим показателем производительности fork-join-системы является время пребывания запроса в системе от момента его поступления до момента синхронизации. Точный анализ этого времени является сложной задачей из-за зависимости очередей от различных обслуживающих приборов. В случае бесконечных очередей очевидные трудности возникают и при вычислении совместного стационарного распределения длин очередей даже при простейших предположениях о характере входного потока и времен обслуживания. Нахождению такого распределения посвящена работа [1], где рассмотрен случай  $K = 2$ , бесконечные очереди к приборам, стационарный пуассоновский поток и экспоненциальные распределения времен обслуживания. Для fork-join-системы получено функциональное уравнение для производящей функции совместного распределения длины очередей и исследованы вопросы асимптотического поведения совместных вероятностей. Вместе с тем в статье не затрагивается проблема нахождения времени пребывания запросов в системе. Результаты работы [1] используются в статье [2], где выводится формула для среднего времени пребывания в упомянутой системе при упрощающем предположении о том, что интенсивности обслуживания на обоих приборах равны. Для случая  $K > 2$  в работе [2] предложена приближенная формула для вычисления среднего времени пребывания. В исследовании [3] авторы находят среднее время пребывания в fork-join-системе с двумя обслуживающими приборами ( $K = 2$ ) и более общими распределениями времен между поступлениями (гиперэкспоненциальными) и временами обслуживания (эрланговскими). В работе [4] рассматривается метод вычисления стационарного распределения fork-join-системы с марковским потоком,  $K \geq 2$  однородными приборами, характеризующимися экспоненциальным распределением времени обслуживания, и бесконечными очередями. Метод предполагает решение нелинейного матричного интегрального уравнения и усечение пространства состояний процесса, описывающего функционирование системы. Основные результаты получены для случая  $K = 2$ . Более общие случаи рассматривались в литературе (например, [5–8]) только путем приближенного анализа. С состоянием дел в этой области до 2014 г. можно ознакомиться из обзора, приведенного в статье [9].

Вследствие объективной сложности задачи нахождения распределений, характеризующих fork-join-системы, во многих работах авторы ограничиваются анализом *среднего* времени пребывания в системе, главным образом нахождением верхних и (или) нижних границ для этого времени. Исследованию таких границ при различных предположениях о параметрах системы посвящены, в частности, работы [5, 10–14]. При этом в большинстве из них не содержится точных аналитических результатов для указанных границ. Известны только работы [5, 14], где получены удобные для вычислений аналитические выражения для границ среднего времени пребывания. Для экспоненциальной системы с однородными приборами получены нижняя и верхняя границы для среднего времени пребывания [14]. Такие же границы найдены для системы с однородными приборами, с экспоненциальным или эрланговским распределением времени обслуживания [5].

В настоящей статье рассматривается fork-join-система с двумя неоднородными приборами и более общими предположениями о распределении времен обслуживания запросов. Времена обслуживания имеют фазовое распределение, которое включает в себя как частные случаи экспоненциальное, гиперэкспоненциальное и эрланговское распределения. Запросы поступают в систему в стационарном пуассоновском потоке. Каждый из поступающих запросов расщепляется на два задания, которые идут в две подсистемы, состоящие из обслуживающего прибора и буфера. Предполагается, что буфер к одному из приборов неограниченный, а ко второму прибору имеет конечный объем.

**Описание системы.** Рассматривается система массового обслуживания с расщеплением и сборкой запросов. Запросы поступают в систему в стационарном пуассоновском потоке с интенсивностью  $\lambda$ . Каждый поступающий запрос расщепляется на два задания, которые обслужи-

ваются в двух подсистемах  $G_1$  и  $G_2$ . Система  $G_1$  состоит из обслуживающего прибора 1 и бесконечного буфера, а система  $G_2$  – из прибора 2 и конечного буфера размером  $J$ ,  $0 \leq J < \infty$ .

Время обслуживания задания  $k$ -м прибором имеет  $PH$ -распределение с неприводимым представлением  $(\beta_k, S_k)$ ,  $k = 1, 2$ . Это означает, что процесс обслуживания на  $k$ -м приборе происходит под управлением цепи Маркова  $m_t^{(k)}$ ,  $t \geq 0$ , с пространством состояний  $\{1, \dots, M^{(k)}, M^{(k)} + 1\}$ , где состояние  $M^{(k)} + 1$  является поглощающим. Первоначальное состояние цепи устанавливается в соответствии со стохастическим вектором  $\beta_k$ . Интенсивности переходов цепи в множестве несущественных состояний задаются матрицами  $S_k$ , а интенсивности переходов в поглощающие состояния – векторами  $S_0^{(k)} = -S_k e$ ,  $k = 1, 2$ . Здесь и далее  $e$  – вектор-столбец, состоящий из единиц. Функция распределения времени обслуживания на  $k$ -м приборе имеет вид  $B_k(t) = 1 - \beta_k e^{S_k t} e$  с преобразованием Лапласа – Стильтеса  $\chi_k(u) = \beta_k (uI - S_k)^{-1} S_0^{(k)}$ ,  $k = 1, 2$ . Интенсивность обслуживания рассчитывается по формуле  $\mu_k = -[\beta_k S_k^{-1} e]^{-1}$ , среднее время обслуживания определяется как  $b_k = \mu_k^{-1}$ ,  $k = 1, 2$ . Более подробное описание  $PH$ -распределения можно найти, например, в работах [15, 16].

**Цепь Маркова, описывающая процесс функционирования системы.** Пусть в момент времени  $t$   $i_t$  – число заданий в подсистеме  $G_1$ ,  $i \geq 0$ ;  $j_t$  – число заданий в подсистеме  $G_2$ ,  $j = \overline{0, J}$ ;  $m_t^{(k)}$  – состояние (фаза) управляющего процесса  $PH$ -обслуживания на  $k$ -м приборе,  $m_t^{(k)} = \overline{1, M^{(k)}}$ ,  $k = 1, 2$ .

Функционирование системы описывается регулярной неприводимой цепью Маркова  $\xi_t$ ,  $t \geq 0$ , с пространством состояний

$$\begin{aligned} \Omega = & \{(0, 0)\} \cup \{(i, 0, m^{(1)}), i > 0, m^{(1)} = \overline{1, M^{(1)}}\} \cup \\ & \cup \{(0, j, m^{(2)}), j = \overline{0, J}, m^{(2)} = \overline{1, M^{(2)}}\} \cup \\ & \cup \{(i, j, m^{(1)}, m^{(2)}), i > 0, j = \overline{1, J}, m^{(1)} = \overline{1, M^{(1)}}, m^{(2)} = \overline{1, M^{(2)}}\}. \end{aligned}$$

Перенумеруем состояния цепи  $\xi_t$  в лексикографическом порядке и обозначим через  $Q_{i,i'}$  матрицу интенсивностей переходов из состояний со значением  $i$  первой компоненты в состояния со значением  $i'$  этой компоненты. Также обозначим через  $Q_r$  матрицы, которые определены как  $Q_r = Q_{i, i+r-1}$ ,  $i \geq 1, r \geq 0$ .

Чтобы перейти к написанию инфинитезимального генератора  $Q$  цепи Маркова  $\xi_t$ , введем следующие обозначения:

$\mathbf{0}$  – вектор-строка, состоящий из нулей;

$I(O)$  – тождественная (нулевая) матрица;

$\bar{W} + W + 1$ ;

$\otimes (\oplus)$  – символ кронекерова произведения (суммы) матриц [17];

$diag\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  – блочная диагональная матрица, у которой диагональные блоки равны элементам, перечисленным в скобках, а остальные блоки нулевые;

$diag^+\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  – квадратная блочная матрица, у которой наддиагональные блоки равны элементам, перечисленным в скобках, а остальные блоки нулевые;

$diag^-\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  – квадратная блочная матрица, у которой поддиагональные блоки равны элементам, перечисленным в скобках, а остальные блоки нулевые.

**Лемма.** Инфинитезимальный генератор  $Q$  цепи Маркова  $\xi_t$ ,  $t \geq 0$ , имеет блочно-трехдиагональную структуру

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{0,0} & Q_{0,1} & 0 & 0 & \dots \\ Q_{1,0} & Q_1 & Q_2 & 0 & \dots \\ 0 & Q_0 & Q_1 & Q_2 & \dots \\ 0 & 0 & Q_0 & Q_1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

где ненулевые блоки  $Q_{i,i'}$  выглядят следующим образом:

$Q_{0,0}$  – квадратная матрица порядка  $1 + JM_2$ ,

$$Q_{0,0} = \text{diag}\{-\lambda, -\lambda I + S_2, \dots, -\lambda I + S_2, S_2\} + \text{diag}^{-}\{\mathbf{S}_0^{(2)}, \mathbf{S}_0^{(2)} \boldsymbol{\beta}_2, \dots, \mathbf{S}_0^{(2)} \boldsymbol{\beta}_2\};$$

$Q_{0,1}$  – матрица порядка  $(1 + JM_2) \times M_1(1 + JM_2)$ ,

$$Q_{0,1} = \lambda \text{diag}^+\{\boldsymbol{\beta}_1 \otimes \boldsymbol{\beta}_2, \boldsymbol{\beta}_1 \otimes I_{M_2}, \dots, \boldsymbol{\beta}_1 \otimes I_{M_2}\};$$

$Q_{1,0}$  – матрица порядка  $M_1(1 + JM_2) \times (1 + JM_2)$ ,

$$Q_{1,0} = \text{diag}\{\mathbf{S}_0^{(1)}, \mathbf{S}_0^{(1)} \otimes I_{M_2}, \dots, \mathbf{S}_0^{(1)} \otimes I_{M_2}\};$$

$Q_0$  – квадратная матрица порядка  $M_1(1 + JM_2)$ ,

$$Q_0 = \text{diag}\{\mathbf{S}_0^{(1)}, \mathbf{S}_0^{(1)} \boldsymbol{\beta}_1 \otimes I_{M_2}, \dots, \mathbf{S}_0^{(1)} \boldsymbol{\beta}_1 \otimes I_{M_2}\};$$

$Q_1$  – квадратная матрица порядка  $M_1(1 + JM_2)$ ,

$$Q_1 = \text{diag}\{-\lambda S^{(1)}, -\lambda S_1 \oplus S_2, \dots, -\lambda S_1 \oplus S_2, S_1 \oplus S_2\} + \\ + \text{diag}^{-}\{I_{M_1} \otimes \mathbf{S}_0^{(2)}, I_{M_1} \otimes \mathbf{S}_0^{(2)} \boldsymbol{\beta}_2, \dots, I_{M_1} \otimes \mathbf{S}_0^{(2)} \boldsymbol{\beta}_2\};$$

$Q_2$  – квадратная матрица порядка  $M_1(1 + JM_2)$ ,

$$Q_2 = \lambda \text{diag}^+\{I_{M_1} \otimes \boldsymbol{\beta}_2, I_{JM_1M_2}\}.$$

Доказательство леммы проводится путем анализа поведения цепи Маркова  $\xi_t, t \geq 0$ , на бесконечно малом интервале времени.

**Следствие 1.** *Цепь Маркова  $\xi_t, t \geq 0$ , принадлежит классу векторных процессов гибели и размножения.*

Доказательство следует из структуры инфинитезимального генератора и определения векторного процесса гибели и размножения (quasi-birth-and-death process, *QBD*), данного в работе [15].

**Критерий существования стационарного режима.** Критерий существования стационарного режима в рассматриваемой системе совпадает с необходимым и достаточным условием эргодичности цепи Маркова  $\xi_t, t \geq 0$ . Это условие определено в следующей теореме.

**Теорема 1.** *Цепь Маркова  $\xi_t, t \geq 0$ , эргодична тогда и только тогда, когда выполняется неравенство*

$$\lambda(1 - y_J) < \mu_1, \quad (1)$$

где

$$y_J = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu_2}\right)^J / J!}{\sum_{j=0}^J \left(\frac{\lambda}{\mu_2}\right)^j / j!}. \quad (2)$$

Доказательство. Согласно работе [15] необходимым и достаточным условием эргодичности рассматриваемого процесса *QBD* является выполнение неравенства

$$\mathbf{x}Q_2\mathbf{e} < \mathbf{x}Q_0\mathbf{e}, \quad (3)$$

где стохастический вектор  $\mathbf{x}$  будет единственным решением системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{x}(Q_0 + Q_1 + Q_2) = \mathbf{0}, \mathbf{x}\mathbf{e} = 1. \quad (4)$$

Представим вектор  $x$  в виде  $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_j)$ , где вектор  $\mathbf{x}_0$  имеет порядок  $M_1$ , а векторы  $\mathbf{x}_j, j = \overline{1, J}$ , – порядок  $M_1 M_2$ . Тогда с учетом выражений для блоков  $Q_0, Q_1, Q_2$ , приведенных в лемме, систему (4) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0 C_0 + \mathbf{x}_1 (I_{M_1} \otimes \mathbf{S}_0^{(2)}) &= \mathbf{0}, \\ \mathbf{x}_{j-1} \lambda (I_{M_1} \otimes \boldsymbol{\beta}_2) + \mathbf{x}_j C + \mathbf{x}_{j+1} (I_{M_1} \otimes \mathbf{S}_0^{(2)} \boldsymbol{\beta}_2) &= \mathbf{0}, j = \overline{1, J-1}, \\ \mathbf{x}_{J-1} \lambda (I_{M_1} \otimes \boldsymbol{\beta}_2) + \mathbf{x}_J (C + \lambda I_{M_1 M_2}) &= \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$C_0 = S_1 + \mathbf{S}_0^{(1)} \boldsymbol{\beta}_1 - \lambda I_{M_1}, \quad C = (S_1 + \mathbf{S}_0^{(1)} \boldsymbol{\beta}_1) \otimes I_{M_2} - \lambda I_{M_1 M_2} + I_{M_1} \otimes S_2.$$

Теперь представим векторы  $\mathbf{x}_j$  через неотрицательные векторы  $\mathbf{y}_j$  порядка  $M_1$ , удовлетворяющие условию нормировки  $\sum_{j=0}^J \mathbf{y}_j \mathbf{e} = 1$ , следующим образом:  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{y}_0, \mathbf{x}_j = \mathbf{y}_j \otimes \boldsymbol{\delta}_2, j = \overline{1, J}$ , где  $\boldsymbol{\delta}_2$  – стационарный вектор-строка *PH*-процесса обслуживания на приборе 2, т. е. единственное решение системы  $\boldsymbol{\delta}_2 (S_2 + \mathbf{S}_0^{(2)} \boldsymbol{\beta}_2) = 0, \boldsymbol{\delta}_2 \mathbf{e} = 1$ .

Используем указанные выражения для  $\mathbf{x}_j, j = \overline{0, J}$ , и  $\boldsymbol{\delta}_2$  в уравнениях системы (5), предварительно умножив первое из уравнений на  $\mathbf{e}_{M_1}$ , а каждое из последних уравнений  $J$  на  $\mathbf{e}_{M_1 M_2}$ . С учетом соотношений  $\mu_2 = \boldsymbol{\delta}_2 \mathbf{S}_0^{(2)}, (S_1 + \mathbf{S}_0^{(1)} \boldsymbol{\beta}_1) \mathbf{e} = 0^T$  сведем систему (5) к следующей системе линейных алгебраических уравнений для вероятностей  $y_j = \mathbf{y}_j \mathbf{e}, j = \overline{0, J}$ :

$$\begin{aligned} -\lambda y_0 + \mu_2 y_1 &= 0, \\ \lambda y_{j-1} - (\lambda + \mu_2) y_j + \mu_2 y_{j+1} &= 0, j = \overline{1, J-1}, \\ \lambda y_{J-1} - \mu_2 y_J &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда убеждаемся, что вероятности  $y_j, j = \overline{0, J}$ , удовлетворяют системе уравнений равновесия для процесса гибели и размножения с интенсивностью размножения  $\lambda$  и гибели  $\mu_2$ . Тогда из системы (6) и уравнения нормировки следует, что вероятность  $y_j$  имеет вид формулы (2).

Рассмотрим неравенство (3), задающее условие эргодичности. Поставим цель перейти в этом неравенстве от векторов  $\mathbf{x}_j$  к векторам  $\mathbf{y}_j$  и упростить полученное неравенство. Воспользуемся ранее введенным представлением  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{y}_0, \mathbf{x}_j = \mathbf{y}_j \otimes \boldsymbol{\delta}_2, j = \overline{1, J}$ , и подставим векторы  $\mathbf{x}_j$  в таком виде в неравенство (3). После этого, учитывая вид блоков  $Q_0, Q_2$  генератора, заданных в лемме 1, приведем неравенство (3) к виду

$$\lambda \sum_{j=0}^{J-1} y_j < \sum_{j=0}^J y_j \mathbf{S}_0^{(1)}. \quad (7)$$

Обозначим через  $\boldsymbol{\delta}_1$  стационарный вектор *PH*-процесса обслуживания на приборе 1, т. е. единственное решение системы  $\boldsymbol{\delta}_1 (S_1 + \mathbf{S}_0^{(1)} \boldsymbol{\beta}_1) = 0, \boldsymbol{\delta}_1 \mathbf{e} = 1$ . Из системы (5) можно полу-

читать соотношение  $\sum_{j=0}^J y_j = \delta_1$ . Учитывая это соотношение и очевидные равенства  $\sum_{j=0}^{J-1} y_j = 1 - y_J \mathbf{e}$ ,  $\mu_1 = \delta_1 \mathbf{S}_0^{(1)}$ , преобразуем неравенство (7) к виду (1).

Теорема доказана.

**Стационарное распределение.** Обозначим через  $\mathbf{p}_i, i \geq 0$ , векторы стационарных вероятностей цепи Маркова  $\xi_t, t \geq 0$ , соответствующие значению  $i$  первой компоненты. Их можно вычислить, используя алгоритм расчета стационарного распределения векторного процесса гибели и размножения (см., например, [15, 16, 18]). В рассматриваемом случае этот алгоритм запишется следующим образом.

*Алгоритм 1.* Формулы для вычисления векторов стационарных вероятностей имеют вид

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_1 \mathcal{R}^{i-1}, i \geq 2,$$

где матрица  $\mathcal{R}$  есть минимальное неотрицательное решение матричного уравнения

$$\mathcal{R}^2 Q_2 + \mathcal{R} Q_1 + Q_0 = 0,$$

а элементы векторов  $\mathbf{p}_0$  и  $\mathbf{p}_1$  вычисляются как единственное решение следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\mathbf{p}_0 Q_{0,0} + \mathbf{p}_1 Q_{1,0} = 0,$$

$$\mathbf{p}_0 Q_{0,1} + \mathbf{p}_1 (Q_1 + \mathcal{R} Q_2) = 0,$$

$$\mathbf{p}_0 \mathbf{e} + \mathbf{p}_1 (I - \mathcal{R})^{-1} \mathbf{e} = 1.$$

**Характеристики производительности.** Вычислив стационарное распределение  $\mathbf{p}_i, i \geq 0$ , можно найти ряд вероятностных характеристик производительности системы. Приведем важнейшие из них:

– совместное распределение числа заданий в системах  $G_1$  и  $G_2$

$$p_{0,0} = \mathbf{p}_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{0}_{J M_2}^T \end{pmatrix}, \quad p_{0,j} = \mathbf{p}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{[1+(j-1)M_2]}^T \\ \mathbf{e}_{M_2} \\ \mathbf{0}_{(J-j)M_2}^T \end{pmatrix}, \quad i = 0, j > 0,$$

$$p_{i,0} = \mathbf{p}_i \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{M_1} \\ \mathbf{0}_{J M_1 M_2}^T \end{pmatrix}, \quad i > 0, \quad p_{i,j} = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbf{p}_i \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{M_1[1+(j-1)M_2]}^T \\ \mathbf{e}_{M_1 M_2} \\ \mathbf{0}_{(J-j)M_1 M_2}^T \end{pmatrix}, \quad i, j > 0;$$

– стационарное распределение числа заданий в системе  $G_1$   $p_i = \mathbf{p}_i \mathbf{e}, i \geq 0$ ;

– среднее число заданий в системе  $G_1$   $L_1 = \sum_{i=1}^{\infty} i p_i$ ;

– дисперсия числа заданий в системе  $G_1$   $V_1 = \sum_{i=1}^{\infty} i^2 p_i - L_1^2$ ;

– стационарное распределение числа заданий в системе  $G_2$   $q_j = \sum_{i=0}^{\infty} p_{i,j}, j = \overline{0, J}$ ;

– среднее число заданий в системе  $G_2$   $L_2 = \sum_{j=1}^J j q_j$ ;

– дисперсия числа заданий в системе  $G_1$   $V_1 = \sum_{j=1}^J j^2 q_j - L_2^2$ ;

– вероятность того, что система  $G_1$  пуста,  $\kappa_0 = \mathbf{p}_0 \mathbf{e}$ ;

– вектор-строка совместных вероятностей того, что в системе  $G_1$  располагается  $i > 0$  заданий и процесс обслуживания на приборе 1 находится в состоянии  $m_1, m_1 = \overline{1, M_1}$ ,

$$\kappa_i = \mathbf{p}_i \begin{pmatrix} I_{M_1} \\ I_{M_1} \otimes \mathbf{e}_{JM_2} \end{pmatrix}, i > 0;$$

– вероятность того, что система  $G_2$  пуста,

$$\gamma_0 = \mathbf{p}_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{0}_{JM_2}^T \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^{\infty} \mathbf{p}_i \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{M_1} \\ \mathbf{0}_{JM_1M_2}^T \end{pmatrix};$$

– вектор-строка совместных вероятностей того, что в системе  $G_2$  располагается  $j > 0$  заданий и процесс обслуживания на приборе 2 находится в состоянии  $m_2, m_2 = \overline{1, M_2}$ ,

$$\gamma_j = \mathbf{p}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{M_2} \\ O_{(j-1)M_2 \times M_2} \\ I_{M_2} \\ O_{(j-j)M_2 \times M_2} \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^{\infty} \mathbf{p}_i \begin{pmatrix} O_{M_1 \times M_2} \\ O_{(j-1)M_1M_2 \times M_2} \\ \mathbf{e}_{M_1} \otimes I_{M_2} \\ O_{(j-j)M_1M_2 \times M_2} \end{pmatrix}, j = \overline{1, J};$$

– вероятность потерь  $P_{loss} = \gamma_J$ .

**Время пребывания запроса в системе.** Рассмотрим задачу оценивания среднего времени пребывания запроса в системе с момента его поступления до момента выполнения и сборки всех заданий, соответствующих данному запросу. Обозначим это среднее как  $\bar{V}$ . Дальнейшие усилия направим на получение нижней и верхней границ для  $\bar{V}$ , при этом учтем следующие соображения:

1.  $\bar{V}$  не меньше среднего значения максимального времени обслуживания  $\bar{V}_{max,service}(G_1, G_2)$  в системах  $G_1$  и  $G_2$  заданий, принадлежащих одному и тому же запросу.
2.  $\bar{V}$  не превышает среднего значения максимального времени пребывания заданий, принадлежащих одному и тому же запросу,  $\bar{V}_{max,sojourn}(G_1, G_2)$ , если предположить, что системы  $G_1$  и  $G_2$  независимы.
3. Среднее время пребывания в системе  $G_2$   $\bar{V}(G_2)$  не превышает среднего времени пребывания  $\bar{V}(\hat{G}_2)$  в аналогичной системе  $\hat{G}_2$ , имеющей бесконечный буфер.
4. Среднее время пребывания в системе  $G_1$   $\bar{V}(G_1)$ , где входной поток прорежен из-за конечного буфера в системе  $G_2$ , не превышает среднего времени пребывания в аналогичной системе  $\hat{G}_1$  с бесконечным буфером и исходным входным потоком.

Из п. 1 следует неравенство

$$\bar{V} \geq \bar{V}_{max,service}(G_1, G_2). \quad (8)$$

Вычислим правую часть неравенства (8). Пусть  $\zeta_k$  – случайная величина, равная времени обслуживания на приборе  $k, k = 1, 2$ . Тогда среднее значение  $\bar{V}_{max,service}(G_1, G_2)$  равно среднему значению случайной величины  $\zeta = \max\{\zeta_1, \zeta_2\}$ . Учитывая, что времена обслуживания на приборах систем  $G_1$  и  $G_2$  являются независимыми случайными величинами, функция распределения  $\Phi(t)$  случайной величины  $\zeta$  находится как  $\Phi(t) = Pr(\zeta < t) = Pr(\zeta_1 < t, \zeta_2 < t) = (1 - \beta_1 e^{-S_1 t})(1 - \beta_2 e^{-S_2 t})$ . Выполнив ряд алгебраических преобразований, запишем следующую формулу для среднего значения случайной величины  $\zeta$ :

$$\begin{aligned} \bar{V}_{max,service}(G_1, G_2) &= \int_0^\infty td\Phi(t) = \\ &= [\beta_1(-S_1)^{-1} + \beta_2(-S_2)^{-1} + (\beta_1 S_1 \otimes \beta_2 + \beta_1 \otimes \beta_2 S_2)(S_1 \oplus S_2)^{-2}]e. \end{aligned} \quad (9)$$

Из пп. 2–4 следуют неравенства

$$\bar{V} \leq \bar{V}_{max,sojourn}(G_1, G_2) \leq \bar{V}_{max,sojourn}(\hat{G}_1, \hat{G}_2). \quad (10)$$

Введенные выше системы  $\hat{G}_1, \hat{G}_2$  являются системами  $M/PH/1$ , отличающимися только параметрами распределения времени обслуживания. Распределение времени обслуживания в системе  $\hat{G}_k$  описывается неприводимым представлением  $(\beta_k, S_k)$ ,  $k = 1, 2$ . Найдем верхнюю оценку  $\bar{V}_{max,sojourn}(\hat{G}_1, \hat{G}_2)$  искомого среднего  $\bar{V}$  как среднее максимума времен пребывания в системах  $\hat{G}_1$  и  $\hat{G}_2$ . Известно [18], что время пребывания в системе  $M/PH/1$  имеет  $PH$ -распределение. Обозначим неприводимое представление этого распределения для системы  $\hat{G}_k$  как  $(\tau_k, T_k)$ ,  $k = 1, 2$ . Для вычисления верхней границы  $\bar{V}_{max,sojourn}(\hat{G}_1, \hat{G}_2)$  воспользуемся рассуждениями, аналогичными рассуждениям при получении формулы (9). В результате запишем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{max,sojourn}(\hat{G}_1, \hat{G}_2) &= \int_0^\infty td(1 - \tau_1 e^{T_1 t} e)(1 - \tau_2 e^{T_2 t} e) = \\ &= [\tau_1(-T_1)^{-1} + \tau_2(-T_2)^{-1} + (\tau_1 T_1 \otimes \tau_2 + \tau_1 \otimes \tau_2 T_2)(T_1 \oplus T_2)^{-2}]e. \end{aligned} \quad (11)$$

Далее необходимо получить выражения для параметров  $\tau_k, T_k$ ,  $k = 1, 2$ , распределений времени пребывания в системах  $\hat{G}_1$  и  $\hat{G}_2$ . Поскольку все дальнейшие результаты по нахождению времени пребывания справедливы для любой системы  $M/PH/1$ , включая системы  $\hat{G}_k$ ,  $k = 1, 2$ , во избежание громоздких выражений будем опускать индекс  $k$  в обозначениях  $\beta_k, S_k, \tau_k, T_k$ .

Согласно работе [18] при выводе выражений для параметров  $\tau, T$  используются блоки генератора цепи Маркова, описывающей функционирование системы  $M/PH/1$  с  $PH$ -распределением времени обслуживания, заданным представлением  $M$ -го порядка  $(\beta, S)$ . Этот генератор имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} A_{0,0} & A_2 & O & O & \dots \\ A_0 & A_1 & A_2 & O & \dots \\ O & A_0 & A_1 & A_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

где

$$A_{0,0} = -\lambda_M, A_0 = S_0 \beta, A_1 = -\lambda_M + S, A_2 = \lambda_M.$$

Обозначим через  $\pi_i$ ,  $i \geq 0$ , векторы стационарного распределения состояний системы в произвольный момент времени. Векторы  $\pi_i$ ,  $i \geq 0$ , вычисляются по алгоритму, аналогичному алгоритму 1, с минимальными изменениями. Для удобства читателя приведем этот алгоритм.

*Алгоритм 2.* Векторы стационарных вероятностей состояний системы  $M/PH/1$  вычисляются по формуле

$$\pi_i = \pi_0 R^i, i \geq 1,$$

где матрица  $R$  – минимальное неотрицательное решение матричного уравнения

$$R^2 A_0 + R A_1 + A_2 = O,$$

а вектор  $\pi_0$  является единственным решением следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\pi_0(A_{0,0} + R A_0) = 0, \quad \pi_0(I - R)^{-1} e = 1.$$

Далее используем результаты статьи [18] для нахождения времени пребывания в системе массового обслуживания, работа которой описывается общим векторным процессом гибели и размножения. Модифицируя эти результаты для системы  $M/PH/1$ , получим следующее утверждение.

**Теорема 2.** *Время пребывания в рассматриваемой системе распределено по фазовому закону с неприводимым представлением  $(\tau, T)$ , где вектор-строка  $\tau$  и квадратная матрица  $T$  имеют порядок  $M^2$  и вычисляются по формулам*

$$\tau = \zeta^T (I_M \otimes \hat{\Delta}), \quad T = (A_1 + A_2) \otimes I_M + A_0 \otimes \hat{\Delta}^{-1} \hat{R}^T \hat{\Delta}, \quad (12)$$

где

$$\zeta = \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \vdots \\ \zeta_M \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$\zeta_l$  – вектор-столбец порядка  $M$ ,  $l$ -й элемент которого равен единице, а остальные элементы равны нулю,  $\hat{\Delta}$  – диагональная матрица порядка  $M$ , диагональные элементы которой равны соответствующим элементам вектора

$$\hat{\eta} = \{\pi_0 A_2 [I + (A_1 + R A_0)^{-1} A_2]^{-1} e\}^{-1} \pi_0 A_2 (I - \hat{R})^{-1}, \quad (14)$$

а матрица  $\hat{R}$  вычисляется как

$$\hat{R} = -(A_1 + R A_0)^{-1} A_2. \quad (15)$$

**Следствие 2.** *Верхняя граница  $\bar{V}_{\max, \text{sojourn}}(\hat{G}_1, \hat{G}_2)$  вычисляется по формуле (11), где векторы  $\tau_k$  и матрицы  $T_k$ ,  $k = 1, 2$ , определяются формулами (12)–(15), в которых все встречающиеся обозначения снабжены индексом  $k$ .*

Таким образом, из формул (8)–(11) следует, что нижняя и верхняя оценки среднего времени пребывания  $\bar{V}$  в рассматриваемой fork-join-системе находятся из неравенств

$$\begin{aligned} & [\beta_1(-S_1)^{-1} + \beta_2(-S_2)^{-1} + (\beta_1 S_1 \otimes \beta_2 + \beta_1 \otimes \beta_2 S_2)(S_1 \oplus S_2)^{-2}] e \leq \bar{V} \leq \\ & \leq [\tau_1(-T_1)^{-1} + \tau_2(-T_2)^{-1} + (\tau_1 T_1 \otimes \tau_2 + \tau_1 \otimes \tau_2 T_2)(T_1 \oplus T_2)^{-2}] e, \end{aligned}$$

где векторы  $\tau_k$  и матрицы  $T_k$ ,  $k = 1, 2$ , определены в теореме 2 и следствии 2.

**Заключение.** В статье исследована система массового обслуживания со стационарным пуассоновским потоком и расщеплением и сборкой запросов. Каждый из поступающих запросов расщепляется на два задания, идущих в две подсистемы, каждая из которых состоит из обслуживающего прибора и буфера. Времена обслуживания заданий имеют  $PH$ -распределение с разными параметрами. Функционирование системы описано в терминах многомерной

цепи Маркова. Определено условие существования стационарного режима, предложены алгоритмы вычисления стационарного распределения и ряда стационарных характеристик производительности системы. Получены аналитические выражения для нижней и верхней границ среднего времени пребывания запроса в системе. Результаты исследования могут быть использованы для моделирования различных компьютерных и коммуникационных систем, в частности систем, в которых выполняются параллельные вычисления, обработка запросов в распределенных базах данных и параллельный доступ к диску.

## References

1. Flatto L., Hahn S. Two parallel queues created by arrivals with two demands. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1984, vol. 44, pp. 1041–1053.
2. Nelson R., Tantawi A. N. Approximate analysis of fork/join synchronization in parallel queues. *IEEE Transactions on Computers*, 1988, vol. 37, pp. 739–743.
3. Kim C., Agrawala A. K. Analysis of the fork-join queue. *IEEE Transactions on Computers*, 1989, vol. 38, pp. 250–255.
4. Qiu Z., Juan P., Harrison H. G. Beyond the mean in fork-join queues: Efficient approximation for response-time tails. *Performance Evaluation*, 2015, vol. 91, pp. 99–116.
5. Lui J. C.-S., Muntz R. R., Towsley D. *Computing Performance Bounds for Fork-Join Queueing Models*. Los Angeles, University of California, Computer Science Department, 1994, 38 p.
6. Varma S., Makowski A. M. Interpolation approximations for symmetric fork-join queues. *Performance Evaluation*, 1994, vol. 20, pp. 245–265.
7. Ko S.-S., Serfozo R. F. Response times in M/M/s fork-join networks. *Advances in Applied Probability*, 2004, vol. 36, pp. 854–871.
8. Ko S.-S., Serfozo R. F. Sojourn times in G/M/1 fork-join networks. *Naval Research Logistics*, 2008, vol. 55, pp. 432–443.
9. Thomasian A. Analysis of fork/join and related queueing systems. *ACM Computing Surveys*, 2014, vol. 47, pp. 1–71.
10. Wang W., Harchol-Balter M., Jiang H., Scheller-Wolf A., Srikant R. Delay asymptotics and bounds for multitask parallel jobs. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 2018, vol. 46, pp. 2–7.
11. Lee K., Shah N. B., Huang L., Ramchandran K. TheMDS queue: analysing the latency performance of erasure codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2017, vol. 63, pp. 2822–2842.
12. Rizk A., Poloczek F., Ciucu F. Stochastic bounds in fork-join queueing systems under full and partial mapping. *Queueing Systems*, 2016, vol. 83, pp. 261–291.
13. Baccelli F., Makowski A. M., Shwartz A. The fork-join queue and related systems with synchronization constraints: stochastic ordering and computable bounds. *Advances in Applied Probability*, 1989, vol. 21, pp. 629–660.
14. Balsamo S., Donatiello L., Van Dijk N. M. Bound performance models of heterogeneous parallel processing systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1998, vol. 9, pp. 1041–1056.
15. Neuts M. F. *Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models*. Baltimore, The Johns Hopkins University Press, 1981, 352 p.
16. Dudin A. N., Klimenok V. I., Vishnevsky V. M. *The theory of queueing systems with correlated flows*. Springer, 2020, 430 p.
17. Graham A. *Kronecker Products and Matrix Calculus with Applications*. Ellis Horwood, Chichester, 1981, 130 p.
18. Ozawa T. Sojourn time distributions in the queue defined by a general QBD process. *Queueing Systems*, 2006, vol. 53, pp. 203–211.

## Информация об авторе

Клименок Валентина Ивановна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладного вероятностного анализа, Белорусский государственный университет.  
E-mail: klimenok@bsu.by

## Information about the author

Valentina I. Klimenok, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of Laboratory of Applied Probability, Belarusian State University.  
E-mail: klimenok@bsu.by



УДК: 519.6:537.2  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-61-73>

Оригинальная статья  
Original Paper

## Моделирование электростатического поля заряженного кольца, расположенного внутри бесконечного цилиндра в присутствии тора

Г. Ч. Шушкевич

УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы»,  
ул. Ожешко, 22, Гродно, 230023, Беларусь  
E-mail: [gsys@grsu.by](mailto:gsys@grsu.by)

### Аннотация

**Цели.** Аналитическое решение граничной задачи электростатики для моделирования электростатического поля заряженного кольца, расположенного внутри заземленного бесконечного кругового цилиндра в присутствии идеально проводящего тора. Источник поля – тонкое заряженное кольцо, расположенное на плоскости, перпендикулярной оси цилиндрического экрана.

**Методы.** Для решения поставленной задачи используется метод теорем сложения. Потенциал исходного электростатического поля представлен в виде сферических гармонических функций, затем с помощью теорем сложения, связывающих сферические, цилиндрические и тороидальные гармонические функции, – в виде суперпозиции цилиндрических и тороидальных гармонических функций. Вторичный потенциал электростатического поля также представлен в виде суперпозиции цилиндрических и тороидальных гармонических функций.

**Результаты.** Решение поставленной граничной задачи сведено к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений второго рода относительно коэффициентов, входящих в представление вторичного поля. Численно исследовано влияние некоторых параметров задачи на значение электростатического потенциала внутри заземленного цилиндрического экрана в присутствии тороидального включения. Результаты вычислений представлены в виде графиков.

**Заключение.** Предложенная методика и разработанное программное обеспечение могут найти практическое применение при разработке и конструировании экранов в различных областях техники.

**Ключевые слова:** граничная задача, электростатическое поле, потенциал, теоремы сложения, гармонические функции

**Благодарность.** Работа выполнялась в рамках подпрограммы «Математические модели и методы» Государственной программы научных исследований «Конвергенция 2025».

**Для цитирования.** Шушкевич, Г. Ч. Моделирование электростатического поля заряженного кольца, расположенного внутри бесконечного цилиндра в присутствии тора / Г. Ч. Шушкевич // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 61–73. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-61-73>

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 24.05.2023

Подписана в печать | Accepted 08.06.2023

Опубликована | Published 29.09.2023

# Modeling the electrostatic field of a charged ring located inside an infinite cylinder in the presence of a torus

Gennady Ch. Shushkevich

*Yanka Kupala State University of Grodno,  
st. Ozheshko, 22, Grodno, 230023, Belarus  
E-mail: gsys@grsu.by*

## Abstract

**Objectives.** Analytical solution of the boundary value problem of electrostatics for modeling the electrostatic field of a charged ring located inside a grounded infinite circular cylinder in the presence of a perfectly conducting torus is considered. The field source is a thin charged ring located on a plane perpendicular to the axis of the cylindrical screen. **Methods.** To solve the problem, the method of addition theorems is used. The potential of the initial electrostatic field is presented in the form of spherical harmonic functions and in the form of a superposition of cylindrical and toroidal harmonic functions, using addition theorems relating spherical, cylindrical and toroidal harmonic functions. The secondary potential of the electrostatic field is also represented as a superposition of cylindrical and toroidal harmonic functions.

**Results.** The solution of the formulated boundary problem is reduced to the solution of an infinite system of linear algebraic equations of the second kind with respect to the coefficients included in the representation of the secondary field. The influence of some parameters of the problem on the value of the electrostatic potential inside a grounded cylindrical shield in the presence of a toroidal inclusion is numerically studied. The calculation results are presented in the form of graphs.

**Conclusion.** The proposed technique and the developed software can find practical application in the development and design of screens in various fields of technology.

**Keywords:** boundary value problem, electrostatic field, potential, addition theorems, harmonic functions

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the "Mathematical Models and Methods" of the State Program for Scientific Research "Convergence 2025".

**For citation.** Shushkevich G. Ch. *Modeling the electrostatic field of a charged ring located inside an infinite cylinder in the presence of a torus*. Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 61–73 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-61-73>

**Conflict of interest.** The author declares of no conflict of interest.

**Введение.** Универсальными методами расчета электростатических, магнитных и электромагнитных полей являются численные методы: метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод интегральных уравнений [1–3]. Однако актуальность разработки новых аналитических и численно-аналитических методов решения краевых задач математической физики не уменьшилась и в наши дни. Эти методы по-прежнему остаются основными средствами решения фундаментальных проблем, создают основу для тестирования решения краевых задач, полученных численными методами. Метод разделения переменных и аппарат функций комплексного переменного наиболее часто используются для аналитического решения граничных задач математической физики [4, 5]. Обобщением метода разделения переменных для решения граничных задач со смешанными граничными условиями является метод парных (тройных) уравнений, который позволяет свести решение поставленной граничной задачи к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода, которое обычно не имеет аналитического решения в замкнутой форме, либо к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений второго рода. Этот метод применялся для решения электростатических задач для одиночных тонких незамкнутых оболочек<sup>1</sup> [6–12]. При решении граничных задач математической физики для многосвязных областей успешно применялся метод теорем сложения<sup>2</sup> [13–15]. Совместное

<sup>1</sup>Кадников, С. Н. Методы расчета электростатического поля тонких оболочек и их применение в технике высоких напряжений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.05 / С. Н. Кадников ; НИИ. – Новочеркасск, 1990. – 42 с.

<sup>2</sup>Ерофенко, В. Т. Метод теорем сложения и теория усредненных граничных условий в краевых задачах электродинамики : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.03 / В. Т. Ерофенко ; БГУ. – Минск, 1993. – 29 с.

использование теорем сложения и парных (тройных) уравнений позволило найти аналитическое решение поставленных задач в виде ряда по малому параметру для двух и более проводников, представляющих собой как полные, так и неполные координатные поверхности [16–24]. Отметим, что для решения некоторых электростатических задач использовались функции Грина, метод зеркальных изображений [25, 26] и метод Т-матриц [27]. Численное решение задачи проникновения электростатического поля через прямоугольное отверстие внутрь параллелепипеда с идеально тонкими стенками приведено в работе [28].

В настоящей статье разработана методика аналитико-численного решения задачи Дирихле для системы двух тел (экранов) в присутствии источника электростатического поля с применением теории сферических, тороидальных и цилиндрических гармонических функций. Система компьютерной математики Mathcad [29] использована для проведения вычислительных экспериментов.

**Постановка и представление решения задачи.** Пусть однородное, изотропное пространство  $R^3$  с диэлектрической проницаемостью среды  $\epsilon$  разделено бесконечным круговым цилиндрическим экраном  $\Gamma$  радиуса  $b$  на два полупространства  $D_1$  и  $D_2$ . В полупространстве  $D_1$  на оси цилиндрического экрана  $\Gamma$  расположен тороидальный экран  $T$  с малым радиусом  $r$  и большим  $R$ . Осевое сечение экранов показано на рис. 1.

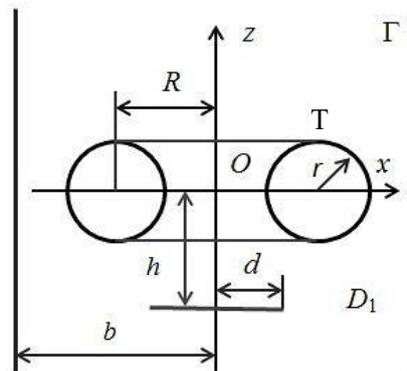


Рис. 1. Осевое сечение экранов  
 Fig. 1. Axial cross-section of shields

Для постановки граничной задачи в точке  $O$  введем декартовы координаты  $Oxyz$ . Декартовы координаты  $Oxyz$  связаны со сферическими координатами  $Or\theta\varphi$  соотношениями

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, \quad y = r \sin \theta \sin \varphi, \quad z = r \cos \theta,$$

где  $0 \leq r < \infty$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ,

с цилиндрическими координатами  $Or\varphi z$  – соотношениями

$$x = \rho \cos \varphi, \quad y = \rho \sin \varphi, \quad z = z,$$

где  $0 \leq \rho < \infty$ ,  $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ ,  $-\infty < z < \infty$ ,

и тороидальными координатами  $O\alpha\beta\varphi$  – соотношениями

$$x = \frac{c \operatorname{sh} \alpha \cos \varphi}{c \operatorname{ch} \alpha - \cos \varphi}, \quad y = \frac{c \operatorname{sh} \alpha \sin \varphi}{c \operatorname{ch} \alpha - \cos \varphi}, \quad z = \frac{c \sin \beta}{c \operatorname{ch} \alpha - \cos \varphi},$$

где  $0 \leq \alpha < \infty$ ,  $-\pi \leq \beta \leq \pi$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ,  $c = \sqrt{R^2 - r^2}$ .

Тогда поверхности тороидального  $T$  и цилиндрического экранов  $\Gamma$  описываются равенствами

$$T = \left\{ \alpha = \alpha_0 = \ln \left( \frac{R}{r} + \sqrt{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1} \right), -\pi \leq \beta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\},$$

$$\Gamma = \{ \rho = b, -\pi \leq \varphi \leq \pi, -\infty < z < \infty \}.$$

В области  $D_1$  на плоскости  $z = -h$  находится заряженная нить, расположенная на окружности радиуса  $d$ . Полагаем, что заряд  $q$  равномерно распределен по окружности, тогда линейная плотность зарядов  $\tau = q / 2\pi d$ . В результате взаимодействия первичного электростатического поля с экранами  $\Gamma$  и  $T$  образуется вторичное поле. Обозначим потенциал вторичного поля в области  $D_1$  через  $U_1$ , а исходного электростатического поля – через  $U_0$ .

**Постановка задачи.** Требуется найти вторичный потенциал  $U_1$ , который удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} U_1 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} U_1 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} U_1 = 0, \quad (1)$$

граничным условиям

$$(U_1(M) + U_0(M))|_{M \in T} = V - const, \quad (2)$$

$$(U_1(M) + U_0(M))|_{M \in \Gamma} = 0 \quad (3)$$

и условию на бесконечности

$$U_1(M) \rightarrow 0 \text{ при } M \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где  $V$  – заданный потенциал на поверхности тора,  $M$  – произвольная точка области  $D_1$ .

Потенциал  $U_0$  исходного электростатического поля можно представить через сферические гармонические функции [4]

$$U_0(r, \theta) = Q \sum_{n=0}^{\infty} a_n \left( \frac{\ell}{r} \right)^{n+1} P_n(\cos \theta), \quad r > \ell, \quad (5)$$

где  $Q = \frac{q}{4\pi\epsilon\ell}$ ,  $a_n = (-1)^n P_n(\cos \theta_0)$ ,  $\ell = \sqrt{h^2 + d^2}$ ,  $\cos \theta_0 = h / \ell$ ,  $P_n(\cos \theta)$  – полиномы Лежандра [30], физическая размерность коэффициента  $Q$  [В] =  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с}^3}$  (система единиц СИ).

Вторичный потенциал представим в виде суперпозиции цилиндрических и тороидальных гармонических функций

$$U_1 = U_t(\alpha, \beta) + U_c(\rho, z),$$

$$U_t(\alpha, \beta) = \sqrt{2(ch\alpha - \cos \beta)} Q \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n P_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha) e^{in\beta}, \quad (6)$$

$$U_c(\rho, z) = Q \int_{-\infty}^{\infty} Z(\lambda) I_0(\lambda \rho) e^{i\lambda z} d\lambda, \quad (7)$$

где  $P_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha)$  – функция тора,  $I_0(\lambda \rho)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода [30].

Неизвестные коэффициенты  $X_n$  и функция  $Z(\lambda)$  подлежат определению из граничных условий (2), (3).

**Решение задачи.** Для выполнения граничного условия (2) на поверхности тора Т представим потенциалы  $U_0(r, \theta)$ ,  $U_c(\rho, z)$  через тороидальные гармонические функции.

Воспользуемся следующими теоремами сложения (формулами переразложения), которые связывают сферические и тороидальные гармонические функции [31]:

$$r^{-n-1} P_n(\cos \theta) = \frac{1}{2\pi c^{n+1}} \sqrt{2(ch\alpha - \cos \beta)} \sum_{s=-\infty}^{\infty} D_n^s Q_{s-\frac{1}{2}}(ch\alpha) e^{is\beta}, \quad \alpha > 0,$$

где

$$D_n^s = \left\{ 2P_n(0) + \sum_{k=1}^s f_k^s \left[ sP_{n+k}^k(0) + ik(n+1)P_{n+k}^{k-1}(0) \right] \right\}, \quad D_n^{-s} = \overline{D_n^s}, \quad s \geq 0,$$

$$f_k^s = \frac{2^{3k+1} k!(s+k-1)!}{((2k)!)^2 (s-k)!}, \quad P_n^m(0) = \frac{2^m}{\sqrt{\pi}} \cos\left(\frac{(n+m)\pi}{2}\right) \frac{\Gamma\left(\frac{n+m+1}{2}\right)}{\Gamma\left(1+\frac{n-m}{2}\right)},$$

и цилиндрические и тороидальные гармонические функции:

$$I_0(\lambda\rho) e^{i\lambda z} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2(ch\alpha - \cos \beta)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n(\lambda c) Q_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha) e^{in\beta},$$

где

$$B_n(\lambda c) = \left\{ 2J_0(i\lambda c) + \sum_{k=1}^n (-1)^k f_k^n \left[ nJ_k(i\lambda c) + ikJ_{k-1}(i\lambda c) \right] (i\lambda c)^k \right\}, \quad B_{-n}(\lambda c) = \overline{B_n(\lambda c)},$$

$Q_{s-\frac{1}{2}}(ch\alpha)$  – функция тора,  $P_n^m(0)$  – присоединенная функция Лежандра первого рода,  $J_k(x)$  – функция Бесселя первого рода,  $\Gamma(n)$  – гамма-функция [30].

Используя вышеприведенные формулы, связывающие гармонические функции, представим потенциалы  $U_0(r, \theta)$ ,  $U_c(\rho, z)$  через тороидальные гармонические функции:

$$U_0(\alpha, \beta) = Q \sqrt{2(ch\alpha - \cos \beta)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathbb{F}_n(c) Q_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha) e^{in\beta}, \quad (8)$$

$$U_c(\alpha, \beta) = Q \frac{1}{2\pi} \sqrt{2(ch\alpha - \cos \beta)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} Z(\lambda) B_n(\lambda c) d\lambda \right) Q_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha) e^{in\beta}, \quad (9)$$

где

$$\mathbb{F}_n\left(\frac{\ell}{c}\right) = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=0}^{\infty} a_p \left(\frac{\ell}{c}\right)^{p+1} D_p^n.$$

С учетом представлений для потенциалов (6), (8), (9) граничное условие (2) на поверхности тора принимает вид

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( X_n P_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha_0) + \mathbb{F}_n\left(\frac{c}{\ell}\right) Q_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha_0) + \left( \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\lambda) B_n(\lambda c) d\lambda \right) Q_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha_0) \right) e^{in\beta} = \frac{V}{Q\sqrt{2(ch\alpha_0 - \cos\beta)}}. \quad (10)$$

На основании формулы [30]

$$\frac{1}{\sqrt{2(ch\alpha_0 - \cos\beta)}} = \frac{1}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha_0) e^{in\beta}$$

и в силу единственности разложения в ряд Фурье из равенства (10) получим

$$X_n + \mathbb{F}_n\left(\frac{\ell}{c}\right) \mathfrak{R}_n(ch\alpha_0) + \frac{1}{2\pi} \mathfrak{R}_n(ch\alpha_0) \int_{-\infty}^{\infty} Z(\lambda) B_n(\lambda c) d\lambda = \frac{V}{\pi Q} \mathfrak{R}_n(ch\alpha_0), \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (11)$$

где

$$\mathfrak{R}_n(ch\alpha_0) = \frac{Q_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha_0)}{P_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha_0)}.$$

Для выполнения граничного условия (3) на поверхности цилиндра представим потенциалы  $U_0(r, \theta)$ ,  $U_t(\alpha, \beta)$  через цилиндрические гармонические функции, используя следующие теоремы сложения [31]:

$$r^{-n-1} P_n(\cos\theta) = \frac{(-i)^n}{\pi n!} \int_{-\infty}^{\infty} \lambda^n K_0(|\lambda\rho|) e^{i\lambda z} d\lambda,$$

$$\sqrt{2(ch\alpha - \cos\beta)} P_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha) e^{in\beta} = \frac{c}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_n(\lambda c) K_0(|\lambda\rho|) e^{i\lambda z} d\lambda, \quad \rho > c,$$

где  $K_0(\lambda\rho)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода (функция Макдональда) [30].

С учетом приведенных теорем сложения получим представления потенциалов  $U_t(\alpha, \beta)$ ,  $U_0(r, \theta)$  через цилиндрические гармонические функции:

$$U_0(\rho, z) = Q \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \ell^{n+1} \frac{(-i)^n}{n!} \lambda^n \right) K_0(|\lambda\rho|) e^{i\lambda z} d\lambda, \quad (12)$$

$$U_t(\rho, z) = Q \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{c}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n B_n(\lambda c) \right) K_0(|\lambda\rho|) e^{i\lambda z} d\lambda, \quad \rho > c. \quad (13)$$

На основании преобразования Фурье и представлений (7), (12), (13) граничное условие (3) принимает вид

$$Z(\lambda) I_0(\lambda b) + \frac{c}{\pi} K_0(|\lambda b|) \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n B_n(\lambda c) + K_0(|\lambda b|) \left( \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \ell^{n+1} \frac{(-i)^n}{n!} \lambda^n \right) = 0. \quad (14)$$

Исключим из уравнения (11) функцию  $Z(\lambda)$ , используя представление (14), и получим бесконечную систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $X_n$  с безразмерными параметрами  $\tau = \frac{r}{R}$ ,  $ch\alpha_0 = \frac{1}{\tau}$ ,  $\frac{c}{b} = \frac{R}{b} \sqrt{1-\tau^2}$ :

$$X_n - \sum_{p=-\infty}^{\infty} L_{n,p} X_p = \frac{V}{\pi Q} \mathfrak{R}_n(\tau) - \mathbb{F}_n\left(\frac{\ell}{c}\right) \mathfrak{R}_n(\tau) + N_n, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (15)$$

где

$$L_{n,p} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{c}{b} \mathfrak{R}_n(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K_0(|t|)}{I_0(t)} B_n\left(\frac{c}{b}t\right) B_p\left(\frac{c}{b}t\right) dt,$$

$$N_n = \frac{1}{2\pi^2} \mathfrak{R}_n(\tau) \sum_{p=0}^{\infty} a_p \left(\frac{\ell}{b}\right)^{p+1} \frac{(-i)^p}{p!} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K_0(|t|)}{I_0(t)} B_n\left(\frac{c}{b}t\right) t^p dt.$$

Представив потенциалы  $U_i(\rho, z)$ ,  $U_c(\rho, z)$  через решение системы (15) и учитывая (14), запишем равенства

$$U_i(\rho, z) = Q \frac{1}{\pi} \frac{c}{b} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n \left( \int_{-\infty}^{\infty} B_n\left(\frac{c}{b}t\right) K_0\left(\frac{\rho}{b}|t|\right) e^{i\frac{z}{b}t} dt \right), \quad \rho > c; \quad (16)$$

$$U_c(\rho, z) = -Q \frac{1}{\pi} \frac{c}{b} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n \left( \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K_0(|t|)}{I_0(t)} B_n\left(\frac{c}{b}t\right) I_0\left(\frac{\rho}{b}t\right) e^{i\frac{z}{b}t} dt \right) - Q \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \left(\frac{\ell}{b}\right)^{n+1} \frac{(-i)^n}{n!} \left( \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K_0(|t|)}{I_0(t)} t^n I_0\left(\frac{\rho}{b}t\right) e^{i\frac{z}{b}t} dt \right). \quad (17)$$

Для вычисления потенциала  $U_i(\alpha, \beta)$  через цилиндрические гармонические функции при  $\rho < c$  воспользуемся следующей теоремой сложения:

$$\sqrt{2(ch\alpha - \cos\beta)} P_{n-\frac{1}{2}}(ch\alpha) e^{in\beta} = \frac{c}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C_n(\lambda c) I_0(\lambda \rho) e^{i\lambda z} d\lambda, \quad \rho < c,$$

где

$$C_n(\lambda c) = 2\tilde{K}_0(\lambda c) + \sum_{s=1}^{|n|} (-1)^s \tilde{f}_s^{|n|} \left[ |n| \tilde{K}_s(\lambda c) - s \frac{|n|}{n} \tilde{K}_{s-1}(\lambda c) \right] (\lambda c)^s,$$

$$\tilde{f}_s^{|n|} = \frac{2^{3s+1} s! (|n| + s - 1)!}{((2s)!)^2 (|n| - s)!}, \quad \tilde{K}_s(x) = (\operatorname{sgn} x)^s K_s(|x|).$$

Тогда потенциал  $U_i(\alpha, \beta)$  примет вид

$$U_i(\rho, z) = Q \frac{1}{\pi b} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n \left( \int_{-\infty}^{\infty} C_n \left( \frac{c}{b} t \right) I_0 \left( \frac{\rho}{b} t \right) e^{i \frac{z}{b} t} dt \right), \quad \rho < c. \quad (18)$$

**Вычислительный эксперимент.** Используя систему компьютерной математики Mathcad [29], вычислим вторичный потенциал электростатического поля  $U_1(\rho, z) = U_i(\rho, z) + U_c(\rho, z)$  по формулам (16)–(18) в области  $D_1$  для некоторых параметров задачи. Бесконечная система (15) решена методом усечения [32]. Для получения достоверного решения конечной системы линейных алгебраических уравнений необходимо проверить обусловленность системы. Матрица, соответствующая системе, считается хорошо обусловленной, если число обусловленности матрицы меньше 300 [33, с. 150]. Для вычисления числа обусловленности матрицы использовались встроенные функции  $\text{cond1}$  (число обусловленности в норме  $L_1$ ),  $\text{cond2}$  (в норме  $L_2$ ) и  $\text{conde}$  (в евклидовой норме). Вычислительный эксперимент показал, что для рассмотренных параметров задачи порядок усечения матрицы можно взять равным 21. Все сходящиеся бесконечные суммы вычислены с точностью  $10^{-5}$ . Несобственные интегралы вычислены по методике, предложенной в работе [32, с. 503].

Приведем некоторые результаты расчетов. Возьмем геометрические параметры задачи:

$$\tau = \frac{r}{R} = \frac{1}{10}, \quad \frac{R}{b} = \frac{1}{2}, \quad \frac{c}{b} = \frac{R}{b} \sqrt{1 - \tau^2}, \quad \frac{h}{b} = \frac{1}{4}, \quad \frac{d}{b} = \frac{1}{5}, \quad \frac{\ell}{b} = \sqrt{\left(\frac{h}{b}\right)^2 + \left(\frac{d}{b}\right)^2}, \quad \frac{\ell}{c} = \frac{\ell}{b} \left(\frac{c}{b}\right)^{-1}.$$

На рис. 2, *a* изображены графики нормированного вторичного потенциала  $|U_1(1,5R, z)|/Q$  ( $\rho > c$ ),  $-3 \leq z/R \leq 3$ , в области  $D_1$  при некоторых значениях  $V/Q$  (значения приведены в правом углу рисунка), а на рис. 2, *b* – при  $r = 0,4R$  (малый радиус тора увеличен в четыре раза).

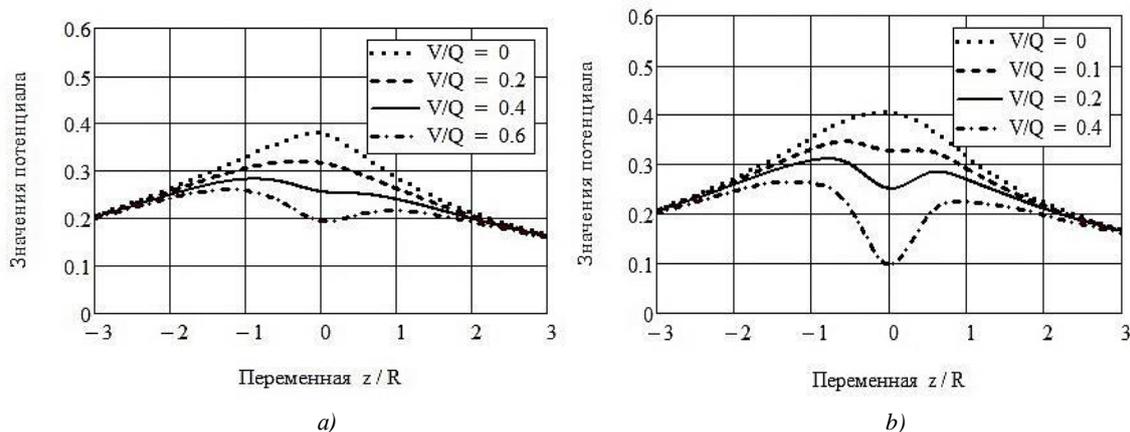


Рис. 2. Графики нормированного вторичного потенциала  $U_1(1,5R, z)/Q$ :  $r = 0,1R$  (*a*) и  $r = 0,4R$  (*b*)

*Fig. 2. Plots of the normalized secondary potential  $U_1(1,5R, z)/Q$ :  $r = 0,1R$  (*a*) and  $r = 0,4R$  (*b*)*

При увеличении величины  $V/Q$  значение нормированного вторичного потенциала  $|U_1(1,5R, z)|/Q$  ( $\rho > c$ ) уменьшается при  $z \rightarrow 0$ , когда малый радиус тора увеличивается. Значение  $|U_1(1,5R, z)|/Q$  не изменяется при изменении малого радиуса тора и увеличении  $V/Q$  для  $|z| > 1$ .

На рис. 3, *a* показаны графики нормированного вторичного потенциала  $|U_1(0,5R, z)|/Q$  ( $\rho < c$ ),  $-3 \leq z/R \leq 3$ ,  $r = 0,1R$ , при некоторых значениях  $V/Q$  (значения приведены в правом

углу рисунка), а на рис. 3,  $b$  – при  $r=0,4R$  (малый радиус тора увеличен в четыре раза). Остальные параметры не изменены.

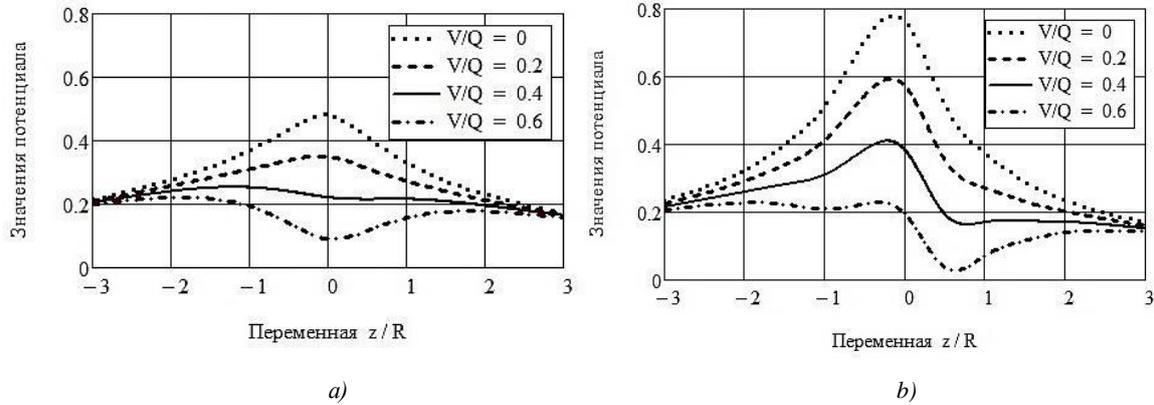


Рис. 3. Графики нормированного вторичного потенциала  $|U_1(0,5R,z)|/Q$ :  $r=0,1R$  (a) и  $r=0,4R$  (b)

Fig. 3. Plots of the normalized secondary potential  $|U_1(0,5R,z)|/Q$ :  $r=0,1R$  (a) and  $r=0,4R$  (b)

При увеличении величины  $V/Q$  значение нормированного вторичного потенциала  $|U_1(0,5R,z)|/Q$  ( $\rho < c$ ) уменьшается при  $r=0,1R$  (диапазон изменения потенциала от 0,5 до 0,1) и при  $r=0,4R$  (диапазон изменения потенциала от 0,8 до 0).

На рис. 4,  $a$  изображены графики нормированного вторичного потенциала  $|U_1(\rho,0,5R)|/Q$ ,  $0 \leq \rho/R \leq 2$ , при  $\tau = \frac{r}{R} = \frac{2}{5}$ ,  $\frac{R}{b} = \frac{1}{2}$ ,  $\frac{h}{b} = \frac{1}{200}$ ,  $\frac{d}{b} = \frac{1}{4}$  и некоторых значениях  $V/Q$  (значения приведены в правом углу рисунка), а на рис. 4,  $b$  – графики нормированного вторичного потенциала  $|U_1(\rho,0,2R)|/Q$ ,  $0 \leq \rho/R \leq 2$ , при  $r=0,1R$  (малый радиус тора уменьшен в четыре раза). В данном случае источник поля (заряженная нить) расположен на плоскости  $Oxy$ .

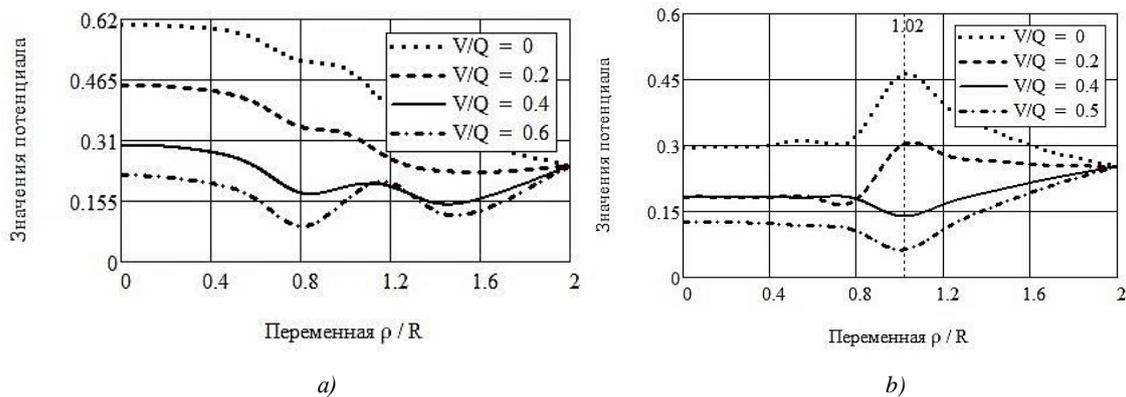


Рис. 4. Графики нормированного вторичного потенциала:  $|U_1(\rho,0,5R)|/Q$ ,  $r=0,4R$  (a) и  $|U_1(\rho,0,2R)|/Q$ ,  $r=0,1R$  (b)

Fig. 4. Plots of the normalized secondary potential:  $|U_1(\rho,0,5R)|/Q$ ,  $r=0,4R$  (a) and  $|U_1(\rho,0,2R)|/Q$ ,  $r=0,1R$  (b)

Значение нормированного потенциала  $|U_1(\rho,0,5R)|/Q$  при  $r=0,4R$  и увеличении  $V/Q$  монотонно убывает (рис. 4,  $a$ ). При уменьшении малого радиуса тора значение нормированного потенциала  $|U_1(\rho,0,2R)|/Q$  при  $r=0,1R$  и увеличении  $V/Q$  монотонно возрастает до  $\rho=1,02R$ , а затем убывает (рис. 4,  $b$ ).

**Заключение.** В статье разработана методика аналитико-численного решения поставленной задачи Дирихле для системы двух тел (экранов). Источником поля является тонкое заряженное кольцо, расположенное на плоскости, перпендикулярной оси цилиндрического экрана. С использованием соответствующих теорем сложения для гармонических функций решение поставленной задачи сведено к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений второго рода относительно коэффициентов, входящих в представление вторичного поля. Численно исследовано влияние некоторых параметров задачи на значение вторичного потенциала электростатического поля внутри заземленного цилиндрического экрана в присутствии тороидального включения. Результаты вычислений даны в виде графиков. Представленные методика и программное обеспечение могут найти практическое применение при разработке и конструировании экранов в различных областях техники.

#### Список использованных источников

1. Дмитриев, В. И. Метод интегральных уравнений в вычислительной электродинамике / В. И. Дмитриев, Е. В. Захаров. – М. : МАКС Пресс, 2008. – 316 с.
2. Ильин, В. П. Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений / В. П. Ильин. – Новосибирск : Ин-т математики, 2000. – 345 с.
3. Исаев, Ю. Н. Методы расчета электромагнитных полей. Практика использования MathCAD, COMSOL Multiphysics / Ю. Н. Исаев, О. В. Васильева. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 162 с.
4. Pierrus, J. Solved Problems in Classical Electromagnetism: Analytical and Numerical Solutions with Comments / J. Pierrus. – Oxford : Oxford University Press, 2018. – 638 p. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198821915.001.0001>
5. Ташаев, Ю. Н. Моделирование электростатического поля тороид / Ю. Н. Ташаев // Успехи прикладной физики. – 2015. – Т. 3, № 2. – С. 126–132.
6. Duffy, D. G. Mixed Boundary Value Problems / D. G. Duffy. – N. Y. : Chapman & Hall/CRC, 2008. – 488 p. <https://doi.org/10.1201/9781420010947>
7. Лебедев, Н. Н. Распределение электричества на тонком сферическом кольце / Н. Н. Лебедев, И. П. Скальская // ЖТФ. – 1982. – Т. 52, № 12. – С. 2325–2331.
8. Виноградов, С. С. К решению краевых задач теории потенциала для незамкнутых эллипсоидов вращения / С. С. Виноградов, Ю. А. Тучкин, В. П. Шестапалов // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1981. – № 12. – С. 47–51.
9. Занадворов, Н. П. Электростатическая задача для полого усеченного конуса / Н. П. Занадворов // ЖТФ. – 1987. – Т. 57, № 4. – С. 634–638.
10. Виноградов, С. С. Расчет электростатических полей проводников в форме сфероидальных оболочек с двумя круглыми отверстиями / С. С. Виноградов, Е. Д. Луценко // Электричество. – 1988. – № 2. – С. 52–55.
11. Шушкевич, Г. Ч. Методика решения электростатической задачи для тонкой незамкнутой сферической оболочки / Г. Ч. Шушкевич // Электричество. – 2010. – № 6. – С. 63–68.
12. Collins, W. D. On some triple series equations and their application / W. D. Collins // Archive for Rational Mechanics and Analysis. – 1962. – Vol. 11, no. 2. – P. 122–137.
13. Ерофеев, В. Т. Задача электростатики для двух тороидальных проводников / В. Т. Ерофеев // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, № 8. – С. 1641–1643.
14. Sampath, C. Some electrostatic problems of two equal co-axial circular strips / C. Sampath, D. Jain // J. Math. and Phys. Sci. – 1991. – Vol. 25, no. 3. – P. 217–230.
15. Shushkevich, G. Ch. Electrostatic problem for a torus placed in an infinite cylinder / G. Ch. Shushkevich // Technical Physics. – 2004. – Vol. 49, no. 5. – P. 540–544. <https://doi.org/10.1134/1.1758325>
16. Шушкевич, Г. Ч. Моделирование полей в многосвязных областях в задачах электростатики / Г. Ч. Шушкевич. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 228 с.
17. Шушкевич, Г. Ч. Расчет емкости двух тонких сферических оболочек / Г. Ч. Шушкевич // Электричество. – 1984. – № 10. – С. 62–64.
18. Шушкевич, Г. Ч. Электростатическое поле тонкой незамкнутой сферической оболочки и двух дисков / Г. Ч. Шушкевич // Электричество. – 1999. – № 6. – С. 28–34.
19. Shushkevich, G. Ch. Electrostatic field of a flattened ellipsoid and disc between two thin open spherical shells / G. Ch. Shushkevich, S. V. Shushkevich // Electrical Technology. – 1996. – No. 1. – P. 89–99.

20. Shushkevich, G. Ch. Electrostatic problem for a torus and a disk / G. Ch. Shushkevich // *Technical Physics*. – 1997. – Vol. 42, no. 4. – P. 436–438. <https://doi.org/10.1134/1.1258698>
21. Shushkevich, G. Ch. Electrostatic field of a thin unclosed spherical shell and a torus / G. Ch. Shushkevich // *Technical Physics*. – 1998. – Vol. 43, no. 7. – P. 743–748. <https://doi.org/10.1134/1.1259067>
22. Shushkevich, G. Ch. Electrostatic problem for a thin unclosed ellipsoidal shell and disk / G. Ch. Shushkevich // *Technical Physics*. – 1999. – Vol. 44, no. 2. – P. 133–136. <https://doi.org/10.1134/1.1259271>
23. Шушкевич, Г. Ч. Электростатическое поле тонкой незамкнутой сферической и сфероидальной оболочек / Г. Ч. Шушкевич // *Электричество*. – 1997. – № 3. – С. 59–64.
24. Шушкевич, Г. Ч. Моделирование поля электростатического диполя в присутствии тонкой сплюснутой незамкнутой эллипсоидальной оболочки и плоскости / Г. Ч. Шушкевич // *Информатика*. – 2017. – № 2. – С. 14–23. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-48-58>
25. Nikolaev, O. Green's functions of the first and second boundary value problems for the Laplace equation in the nonclassical domain / O. Nikolaev, O. Holovchenko, N. Savchenko // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2022. – No. 4. – P. 30–49. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.03>
26. Лоскутников, В. С. Функция Грина и метод изображений в задачах электростатики / В. С. Лоскутников // *Проблемы современной науки и образования*. – 2021. – № 10(167). – С. 6–10.
27. Majlic, M. Electrostatic T-matrix for a torus on bases of toroidal and spherical harmonics / M. Majlic // *J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2019. – Vol. 235. – P. 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.07.010>
28. Ерофеенко, В. Т. Расчет электростатических полей в корпусе с отверстием методом граничных элементов / В. Т. Ерофеенко, Д. В. Комнатный // *Информатика*. – 2011. – № 2(30). – С. 48–55.
29. Шушкевич, Г. Ч. Компьютерные технологии в математике. Система Mathcad 14. Ч. 2 / Г. Ч. Шушкевич, С. В. Шушкевич. – Минск : Изд-во Гревцова, 2012. – 256 с.
30. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами : пер. с англ. / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – 830 с.
31. Ерофеенко, В. Т. Теоремы сложения / В. Т. Ерофеенко. – Минск : Наука и техника, 1989. – 240 с.
32. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – М. : Высшая школа, 2002. – 848 с.
33. Петров, Ю. Обеспечение достоверности и надежности компьютерных расчетов / Ю. Петров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 160 с.

---

---

## References

1. Dmitriev V. I., Zakharov E. V. Metod integral'nykh uravnenii v vychislitel'noi elektrodinamike. *The Method of Integral Equations in Computational Electrodynamics*. Moscow, MAKS Press, 2008, 316 p. (In Russ.).
2. Ilyin V. P. Metody konechnykh raznostei i konechnykh ob'emov dlia ellipticheskikh uravnenii. *Finite Difference and Finite Volume Methods for Elliptic Equations*. Novosibirsk, Institut matematiki, 2000, 345 p. (In Russ.).
3. Isaev Yu. N., Vasilyeva O. V. Metody rascheta elektromagnitnykh poley. Praktika ispol'zovaniya MathCAD, COMSOL Multiphysics. *Methods for the Calculation of Electromagnetic Fields. Practice Using MathCAD, COMSOL Multiphysics*. Saarbruchen, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 162 p. (In Russ.).
4. Pierrus J. *Solved Problems in Classical Electromagnetism: Analytical and Numerical Solutions with Comments*. Oxford, Oxford University Press, 2018, 638 p. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198821915.001.0001>
5. Tashaev Yu. N. *Modeling the electrostatic field of a toroid*. Uspekhi prikladnoy fiziki [Advances in Applied Physics], 2015, vol. 3, no. 2, pp. 126–132 (In Russ.).
6. Duffy D. G. *Mixed Boundary Value Problems*. New York, Chapman & Hall/CRC, 2008, 488 p. <https://doi.org/10.1201/9781420010947>
7. Lebedev N. N., Skalskaya I. P. *Distribution of electricity on a thin spherical ring*. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics], 1982, vol. 52, no. 12, pp. 2325–2331 (In Russ.).
8. Vinogradov S. S., Tuchkin Yu. A., Shestapalov V. P. *On the solution of boundary value problems of potential theory for non-closed ellipsoids of revolution*. Doklady Akademii nauk Ukrainskoj Sovetskoj Socialisticheskoy Respubliki. Serija A [Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic. Serie A], 1981, no. 12, pp. 47–51 (In Russ.).

9. Zanadvorov N. P. *Electrostatic problem for a hollow truncated cone*. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics], 1987, vol. 57, no. 4, pp. 634–638 (In Russ.).
10. Vinogradov S. S., Lutsenko E. D. *Calculation of electrostatic fields of conductors in the form of spheroidal shells with two round holes*. Elektrichestvo [Electricity], 1988, no. 2, pp. 52–55 (In Russ.).
11. Shushkevich G. Ch. *A technique for solving an electrostatic problem for a thin non-closed spherical shell*. Elektrichestvo [Electricity], 2010, no. 6, pp. 63–68 (In Russ.).
12. Collins W. D. *On some triple series equations and their application*. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1962, vol. 11, no. 2, pp. 122–137. <https://doi.org/10.1007/BF00253935>
13. Erofeenko V. T. *Electrostatic problem for two toroidal conductors*. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics], 1986, vol. 56, no. 8, pp. 1641–1643 (In Russ.).
14. Sampath C., Jain D. *Some electrostatic problems of two equal co-axial circular strips*. Journal of Mathematical and Physical Sciences, 1991, vol. 25, no. 3, pp. 217–230.
15. Shushkevich G. Ch. *Electrostatic problem for a torus placed in an infinite cylinder*. Technical Physics, 2004, vol. 49, no. 5, pp. 540–544. <https://doi.org/10.1134/1.1758325>
16. Shushkevich G. Ch. *Modelirovaniye poley v mnogovyaznykh oblastiakh v zadachakh elektrostati. Modeling Fields in Multiply Connected Regions in Electrostatic Problems*. Saarbruchen, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 228 p. (In Russ.).
17. Shushkevich G. Ch. *Calculation of the capacitance of two thin spherical shells*. Elektrichestvo [Electricity], 1984, no. 10, pp. 62–64 (In Russ.).
18. Shushkevich G. Ch. *Electrostatic field of a thin open spherical shell and two disks*. Elektrichestvo [Electricity], 1999, no. 6, pp. 28–34 (In Russ.).
19. Shushkevich G. Ch., Shushkevich S. V. *Electrostatic field of a flattened ellipsoid and disc between two thin open spherical shells*. Electrical Technology, 1996, no. 1, pp. 89–99.
20. Shushkevich G. Ch. *Electrostatic problem for a torus and a disk*. Technical Physics, 1997, vol. 42, no. 4, pp. 436–438. <https://doi.org/10.1134/1.1258698>
21. Shushkevich G. Ch. *Electrostatic field of a thin unclosed spherical shell and a torus*. Technical Physics, 1998, vol. 43, no. 7, pp. 743–748. <https://doi.org/10.1134/1.1259067>
22. Shushkevich G. Ch. *Electrostatic problem for a thin unclosed ellipsoidal shell and disk*. Technical Physics, 1999, vol. 44, no. 2, pp. 133–136. <https://doi.org/10.1134/1.1259271>
23. Shushkevich G. Ch. *Electrostatic field of thin non-closed spherical and spheroidal shells*. Elektrichestvo [Electricity], 1997, no. 3, pp. 59–64 (In Russ.).
24. Shushkevich G. Ch. *Modeling the field of an electrostatic dipole in the presence of a thin oblate open ellipsoidal shell and plane*. Informatika [Informatics], 2017, no. 2, pp. 14–23 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-48-58>
25. Nikolaev O., Holovchenko O., Savchenko N. *Green's functions of the first and second boundary value problems for the Laplace equation in the nonclassical domain*. Radioelectronic and Computer Systems, 2022, no. 4, pp. 30–49. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.03>
26. Loskutnikov V. S. *Green's function and the image method in problems of electrostatics*. Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya [Problems of Modern Science and Education], 2021, no. 10(167), pp. 6–10 (In Russ.).
27. Majlic M. *Electrostatic T-matrix for a torus on bases of toroidal and spherical harmonics*. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2019, vol. 235, pp. 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.07.010>
28. Erofeenko V. T., Komnatnyy D. V. *Calculation of electrostatic fields in a housing with a hole by the boundary element method*. Informatika [Informatics], 2011, no. 2(30), pp. 48–55 (In Russ.).
29. Shushkevich G. Ch., Shushkevich S. V. *Komp'yuternyye tekhnologii v matematike. Sistema Mathcad 14. Chast' 2. Computer Technologies in Mathematics. Mathcad 14. Part 2*. Minsk, Izdatel'stvo Grevcova, 2012, 256 p. (In Russ.).
30. In Abramowitz M., Stegun I. A. *Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, 1965, 1046 p.
31. Erofeenko V. T. *Teoremy slozheniya. Addition Theorems*. Minsk, Nauka i tekhnika, 1989, 240 p. (In Russ.).
32. Verzhbitsky V. M. *Osnovy chislennykh metodov. Fundamentals of Numerical Methods*. Moscow, Vysshaya shkola, 2002, 848 p. (In Russ.).
33. Petrov Yu. *Obespecheniye dostovernosti i nadezhnosti komp'yuternykh raschetov. Ensuring the Reliability and Reliability of Computer Calculations*. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2012, 160 p. (In Russ.).

**Информация об авторе**

*Шушкевич Геннадий Чеславович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры современных технологий программирования, УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы».  
E-mail: gsys@grsu.by

**Information about the author**

*Gennady Ch. Shushkevich*, D. Sc. (Phys.-Math.), Prof. of Modern Programming Technologies Department, Yanka Kupala State University of Grodno.  
E-mail: gsys@grsu.by

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

## INTELLIGENT SYSTEMS



УДК 004.514, 004.822.2  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-74-89>

Оригинальная статья  
Original Paper

## Семантические модели и средства проектирования адаптивных пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем

М. Е. Садовский

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь  
E-mail: sadovski@bsuir.by*

### Аннотация

**Цели.** Предлагаются модели и средства проектирования адаптивных пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем. Актуальность работы определяется необходимостью снижения накладных расходов и сроков разработки пользовательских интерфейсов, обеспечения их адаптации под особенности конкретного пользователя интеллектуальной системы.

**Методы.** Анализируются существующие подходы к проектированию пользовательских интерфейсов. Предлагается семантическая модель адаптивного пользовательского интерфейса интеллектуальных систем, реализованная при помощи базового универсального языка представления знаний, который основан на теории множеств и теории графов.

**Результаты.** Разработаны модель адаптивного пользовательского интерфейса интеллектуальных систем, которая включает модель базы знаний пользовательского интерфейса, агентно-ориентированную модель пользовательского интерфейса и библиотеку многократно используемых компонентов, обеспечивающих интеграцию пользовательского интерфейса в отдельные интеллектуальные системы и коллективы интеллектуальных систем, а также метод передачи компонентов пользовательского интерфейса в рамках коллектива интеллектуальных систем в процессе эксплуатации интеллектуальной системы.

**Заключение.** Представленные модели и средства позволяют упростить повторное (многократное) применение компонентов пользовательского интерфейса совместно с компонентами баз знаний и решателей задач при проектировании и разработке как отдельной интеллектуальной системы, так и коллектива семантически совместимых интеллектуальных систем, обеспечить автоматизацию интеграции пользовательских интерфейсов и их адаптацию для каждого пользователя. Набор компонентов пользовательского интерфейса был включен в библиотеку многократно применяемых компонентов пользовательского интерфейса. В дальнейшем планируется расширение набора компонентов указанной библиотеки и их внедрение в коллектив семантически совместимых интеллектуальных систем.

**Ключевые слова:** адаптивный пользовательский интерфейс, интеллектуальная система, коллектив интеллектуальных систем, персональный ассистент, онтология, семантическая модель

**Для цитирования.** Садовский, М. Е. Семантические модели и средства проектирования адаптивных пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем / М. Е. Садовский // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 74–89. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-74-89>

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 14.07.2023

Подписана в печать | Accepted 14.08.2023

Опубликована | Published 29.09.2023

---

---

## Semantic models and tools for designing adaptive user interfaces of intelligent systems

Mikhail E. Sadouski

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus  
E-mail: sadovski@bsuir.by*

### Abstract

**Objectives.** Models and tools for designing adaptive user interfaces for intelligent systems are being developed. The relevance is determined by the need to reduce overhead costs and development time for user interfaces and to provide their adaptation to the specific characteristics of the user of the intelligent system.

**Methods.** Existing approaches to designing user interfaces are being analyzed. A semantic model of an adaptive user interface for intelligent systems is proposed, implemented using a basic universal language for representing knowledge based on set theory and graph theory.

**Results.** An adaptive user interface model for intelligent systems has been developed, which includes a knowledge base model of the user interface, an agent-oriented model of the user interface, and a library of reusable components that provide integration of the user interface into both individual intelligent systems and intelligent systems groups. A method of transferring user interface components within an intelligent systems group during the operation of an intelligent system has also been developed.

**Conclusion.** Developed models and tools allow to simplify the reuse of user interface components together with knowledge base and problem-solving components in the design and development of individual intelligent systems, as well as in the design and development of a group of semantically compatible intelligent systems, ensuring automation of integration of user interfaces and their adaptation for each user. The developed set of user interface components has been included in a library of reusable user interface components. Further expansion of the set of components in the library and their integration into a group of semantically compatible intelligent systems is planned.

**Keywords:** adaptive user interface, intelligent system, intelligent systems group, personal assistant, ontology, semantic model

**For citation.** Sadouski M. E. *Semantic models and tools for designing adaptive user interfaces of intelligent systems*. Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 74–89 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-74-89>

**Conflict of interest.** The author declares of no conflict of interest.

**Введение.** Организация взаимодействия пользователей с компьютерными системами (в том числе и интеллектуальными) оказывает существенное влияние на эффективность автоматизации человеческой деятельности, опыт и уровень удовлетворенности пользователей.

Одним из ключевых свойств интеллектуальных компьютерных систем нового поколения является их интероперабельность – способность к эффективному взаимодействию. Такие системы являются автономными и самодостаточными субъектами деятельности наравне с человеком.

Однако в основе современной организации взаимодействия пользователя с компьютерной системой лежит парадигма грамотного пользователя, который знает, как управлять системой, и несет полную ответственность за качество взаимодействия с ней [1]. Многообразие форм и видов интерфейсов подводит пользователя к необходимости адаптироваться к каждой конкретной системе, обучаться принципам взаимодействия с ней для решения поставленных задач.

На современном этапе развития искусственного интеллекта для повышения эффективности взаимодействия необходим переход от парадигмы грамотного управления используемым инструментом к парадигме равноправного сотрудничества, партнерского взаимодействия интеллектуальной системы со своим пользователем. Дружественность пользовательского интерфейса должна заключаться в адаптивности системы к особенностям и квалификации пользователя, исключении любых проблем для пользователя в процессе диалога с интеллектуальной системой, постоянном совершенствовании коммуникационных навыков пользователя. Следовательно, необходимо отойти от привычной адаптации пользователя к системе (путем обучения ее использованию) в сторону адаптации самого интерфейса под цели, задачи и характеристики конкретного пользователя в режиме реального времени [2].

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью снижения накладных расходов и сроков разработки пользовательских интерфейсов, обеспечения их адаптации под особенности конкретного пользователя. Поскольку пользователь любой системы общается с ней посредством пользовательского интерфейса, то проблемы, связанные с интерфейсом, часто формируют негативное мнение о всей системе в целом и не позволяют в полной мере использовать ее функционал. Особенно актуальна данная ситуация для интеллектуальных систем, возможности которых значительно шире, чем у традиционных систем [3].

Чтобы удовлетворить потребности каждого пользователя, пользовательский интерфейс должен быть адаптирован к конкретному человеку, что осуществляется с помощью адаптивного пользовательского интерфейса (АПИ). В отличие от адаптированных пользовательских интерфейсов, которые адаптированы к конечному пользователю при проектировании и не изменяются во время эксплуатации системы, адаптивные пользовательские интерфейсы изменяются на основе потребностей пользователя или контекста использования в процессе эксплуатации системы. На сегодняшний день существуют различные подходы и фреймворки для разработки АПИ. Однако эти подходы ограничены конкретными областями применения, а не обобщенным подходом, применимым ко всем областям, а также обеспечивают низкий уровень адаптивности пользовательского интерфейса, который может быть существенно повышен.

Целью настоящего исследования является разработка моделей и средств проектирования АПИ, обеспечивающих комплексный универсальный подход к проектированию АПИ интеллектуальных систем. В соответствии с поставленной целью выделены следующие задачи исследования:

- анализ современных подходов к проектированию АПИ;
- формулирование требований к моделям и средствам проектирования АПИ;
- разработка модели проектирования АПИ;
- разработка средства проектирования АПИ.

В рамках исследования рассматривается переход от проектирования адаптированных пользовательских интерфейсов к проектированию АПИ и предлагаются модели, методы и средства для проектирования таких интерфейсов. Уточняются требования к моделям и средствам проектирования АПИ и предлагается подход к проектированию АПИ на основе семантических моделей и средств.

**Проектирование адаптированного пользовательского интерфейса.** Адаптированный пользовательский интерфейс предполагает создание пользовательского интерфейса, который не будет изменяться в процессе эксплуатации. Часто такой подход к проектированию пользовательских интерфейсов называют классическим [4]. Он предполагает построение макета интерфейса на основании выявленных пользовательских требований, затем создание прототипа, определение структуры диалога и проработку возможных сценариев развития диалога с дальнейшей реализацией интерфейса с помощью подходящей среды программирования.

Один из наиболее важных шагов при проектировании адаптированных интерфейсов – анализ пользователей (целевой аудитории). При разработке такого интерфейса необходимо понимать, какие цели должны достичь пользователи и какие возможности должен предоставлять интерфейс. В данном случае интерфейс будет направлен на решение определенных задач для определенной группы пользователей вне зависимости от личностных характеристик пользователя и контекста использования.

В большинстве случаев проектированием пользовательского интерфейса занимается UI/UX-дизайнер. При создании интерфейса он должен руководствоваться общими принципами проектирования пользовательских интерфейсов, различными стандартами, правилами и руководствами по стилю.

Стоит отметить, что конечный интерфейс пользователя в большей степени может быть адаптирован под различные разрешения экранов устройств (например, мобильного устройства, планшета, компьютера), однако эта адаптация предопределена на этапе создания макета пользовательского интерфейса и разработки.

**Проектирование адаптируемого пользовательского интерфейса.** В адаптируемом пользовательском интерфейсе любая адаптация является предопределенной и может изменяться пользователем как перед началом работы с системой, так и во время эксплуатации.

Процесс проектирования и разработки адаптируемых пользовательских интерфейсов практически совпадает с проектированием и разработкой адаптированных интерфейсов. Возможные адаптации также предопределены заранее, однако пользователь сам решает, в какой момент некоторые из этих адаптаций использовать. Как и в адаптированных интерфейсах, адаптация под разрешение экрана устройства предопределена заранее и пользователь никак не может на нее повлиять.

Недостаток адаптируемого интерфейса заключается в том, что пользователю необходимо достаточно хорошо быть знакомым как с системой, так и со средствами, позволяющими изменить ее интерфейс.

**Проектирование адаптивного пользовательского интерфейса.** Адаптивность предполагает постоянное улучшение пользовательского интерфейса, которое происходит во время эксплуатации системы и зависит от поведения пользователя, а также его изменение на основе потребностей пользователя или контекста использования.

Как правило, контекст использования включает знания [5]:

- о пользователе (предпочтениях, целях и задачах, физическом или эмоциональном здоровье);
- об окружающей среде (температуре, освещенности, шуме, местоположении);
- о платформе (разрешении экрана, емкости аккумулятора, возможности подключения к сети Интернет, браузеру).

Вне зависимости от средств создания АПИ интеллектуальные системы должны эффективно хранить и обрабатывать все указанные выше знания.

В настоящее время существует несколько основных подходов к представлению модели пользовательского интерфейса:

- подход на основе специализированных языков описания;
- контекстно-зависимый;
- моделиориентированный;
- онтологический.

*Подход на основе специализированных языков описания* предполагает представление конкретного пользовательского интерфейса в платформенно независимом виде. В качестве примеров языков описания интерфейса можно привести UIML, UsiXML, XForms (URL: <https://www.w3.org/TR/xforms>) и JavaFX FXML (URL: [https://openjfx.io/javadoc/12/javafx.fxml/javafx/fxml/doc-files/introduction\\_to\\_fxml.html](https://openjfx.io/javadoc/12/javafx.fxml/javafx/fxml/doc-files/introduction_to_fxml.html)) [6, 7]. Ключевой идеей представленных языков является создание модели диалогов и форм интерфейса в независимом от используемой технологии виде, описание визуальных элементов, а также взаимосвязей между ними и их свойств для создания конкретного пользовательского интерфейса.

*Контекстно-зависимый подход* интегрирует использование структурного описания интерфейса на основе языков описания с поведенческой спецификацией, т. е. генерация интерфейса основывается на действиях пользователя. В рамках подхода специфицируются переходы между различными видами конкретного пользовательского интерфейса. В качестве примеров реализации такого подхода можно привести языки CAP3 и MARIA [8, 9].

В рамках *моделеориентированного подхода* [10] модель является базовым средством разработки интерфейса, содержащим декларативные описания высокого уровня абстракции и не содержащим процедурный код. Наборы моделей различны для каждого моделеориентированного средства, также для каждого средства и уровня модели различаются декларативные языки. Это затрудняет не только создание интерфейса в рамках одного моделеориентированного средства, но и его последующее модифицирование и приводит к сильной зависимости разработанной модели от инструментального средства ее разработки.

*Онтологический подход* является развитием моделеориентированного подхода, в рамках которого онтологии используются в качестве способа представления информации о конкретном пользовательском интерфейсе. Например, по аналогии с подходом на основе специализированных языков описания был предложен фреймворк [11], применяющий онтологию для описания пользовательского интерфейса на основе понятий, хранящихся в базе знаний. По аналогии с контекстно-зависимым подходом в рамках работы [12] используется модель предметной области совместно с моделью пользовательского интерфейса, ассоциированная с онтологией действий. Проект ActiveRaUL [13] совмещает UIML с моделеориентированным подходом. В рамках данного проекта онтологическая модель предметной области сопоставляется с онтологическим представлением пользовательского интерфейса. Подход, предложенный в работе [14], совмещает данные приложения с онтологией пользовательского интерфейса для создания единого описания в базе знаний с целью последующей автоматической генерации различных вариантов интерфейса для приложений-опросников с готовыми сценариями взаимодействия с пользователем. Следует также отметить работы [15, 16], в рамках которых предложена концепция, позволяющая объединять однородную по содержанию информацию в компоненты модели интерфейса, освобождать разработчика интерфейса от кодирования и формировать информацию для каждого компонента модели интерфейса с помощью редакторов, управляемых соответствующими моделями онтологий.

Именно онтологический подход позволяет:

- создавать наиболее полное унифицированное описание различных аспектов пользовательского интерфейса;
- легко интегрировать различные аспекты пользовательского интерфейса;
- упрощать повторное использование модели интерфейса.

Большинство современных систем и фреймворков для проектирования АПИ используют онтологическую модель [11, 12, 15–17], а также декларативные языки описания пользовательского интерфейса [6, 7, 9, 18]. Однако для существующих решений остаются актуальными проблема интеграции пользовательского интерфейса с другими компонентами системы и трудоемкость переноса пользовательского интерфейса из одной системы в другую.

Модели и средства проектирования пользовательских интерфейсов традиционных компьютерных систем существенно отличаются от моделей и средств, используемых для проектирования остальных компонентов системы, что приводит к значительным затратам при интеграции спроектированного и разработанного пользовательского интерфейса в систему.

В рамках настоящей работы рассматривается проектирование пользовательского интерфейса интеллектуальных систем, которые включают базу знаний, решатель задач и пользовательский интерфейс.

Особенностями интеллектуальных систем являются:

- возможность унифицированного представления в рамках системы различных видов знаний, моделей обработки знаний и интерфейсов, что обеспечивает совместимость ее компонентов;
- отсутствие многообразия языков представления и обработки знаний;
- способность приобретать новые знания и навыки в процессе эксплуатации, сохраняя при этом корректность и целостность базы знаний.

Трудоемкость переноса пользовательского интерфейса из одной системы в другую обусловлена отсутствием общих принципов проектирования различных интеллектуальных систем (использованием несовместимых моделей и средств при их проектировании и разработке). В этой связи важной задачей является сохранение унифицированного представления пользовательского интерфейса в рамках коллектива интеллектуальных систем, что позволило бы упростить повторное (многократное) применение компонентов пользовательского интерфейса совместно с компонентами баз знаний и решателей задач для любой интеллектуальной системы в рамках указанного коллектива.

**Предлагаемый подход.** В качестве основы для проектирования пользовательских интерфейсов используется онтологический подход на базе семантической модели, предполагающий разработку формальной онтологии пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем. Создание такой онтологии способствует:

- согласованию принципов и методов построения компонентов пользовательского интерфейса;
- унификации интерфейсной деятельности пользователя и интеллектуальной системы;
- декомпозиции процесса проектирования пользовательских интерфейсов и возможности его распараллеливания.

Ключевые принципы предлагаемого подхода заключаются в следующем:

- пользовательский интерфейс предлагается рассматривать в качестве встраиваемой интеллектуальной системы, ориентированной на решение интерфейсных задач пользователя и состоящей из базы знаний и решателя задач;

– при проектировании пользовательского интерфейса должны применяться те же модели и средства, которые используются при проектировании самой интеллектуальной системы. Это позволит легко интегрировать пользовательский интерфейс как в отдельную интеллектуальную систему, так и в коллектив семантически совместимых интеллектуальных систем и использовать те же методики проектирования баз знаний и решателей задач, которые применяются при проектировании интеллектуальной системы;

– при проектировании пользовательского интерфейса предлагается использовать компонентный подход, что даст возможность сократить затраты на последующее проектирование пользовательского интерфейса за счет повторного применения ранее спроектированных компонентов и создания библиотеки многократно используемых компонентов пользовательского интерфейса;

– модель базы знаний пользовательского интерфейса должна быть легко расширяемой и включать в себя [19]:

- модель пользовательского интерфейса и его компонентов;
- модель контекста использования (модель пользователя, действий пользователя, окружающей среды, платформы);
- правила адаптации пользовательского интерфейса;
- правила оценки пользовательского интерфейса;
- методику проектирования пользовательского интерфейса;

– модель решателя задач пользовательского интерфейса должна быть основана на многоагентном подходе и должна включать агента оценки пользовательского интерфейса, адаптации пользовательского интерфейса, анализа действий пользователя, предсказания действий пользователя;

– каждый компонент пользовательского интерфейса должен быть внешним отображением определенного элемента из базы знаний, что позволит использовать его в качестве аргументов пользовательских команд и правильно трактовать прагматику и семантику объектов интерфейсной деятельности, даст возможность пользователю задавать системе вопросы касательно любого из компонентов интерфейса;

– должны быть реализованы средства редактирования базы знаний и средства помощи для проектировщика и разработчика пользовательского интерфейса;

– описание модели базы знаний и решателя задач пользовательского интерфейса предлагается осуществлять на основе универсального унифицированного языка представления знаний, что обеспечит совместимость между этими компонентами.

**Реализация подхода.** В соответствии с предлагаемым подходом технология для проектирования и реализации АПИ должна поддерживать компонентный подход для создания семантических моделей, позволять осуществлять простую интеграцию различных семантических моделей в рамках единой системы и в рамках коллектива интеллектуальных систем, предоставлять возможность описания различных семантических моделей и составляющих их различных видов знаний в едином унифицированном виде.

В качестве используемой технологии была выбрана технология OSTIS, которая соответствует указанным требованиям. Она позволяет создавать семантически совместимые системы (ostis-системы), которые способны обрабатывать запросы и задачи пользователей, учитывая их контекст и смысл. Это достигается за счет использования семантических сетей, которые дают возможность описывать знания и связи между ними. Кроме того, технология OSTIS обеспечивает масштабируемость и гибкость системы, что позволяет ей адаптироваться к изменениям в поведении пользователей и их потребностях [20].

В качестве основы представления знаний в рамках технологии OSTIS используется унифицированный вариант кодирования информации любого рода на основе семантических сетей с базовой теоретико-множественной интерпретацией, названный SC-кодом [21]. Элементы текстов SC-кода (sc-текстов) названы sc-элементами, среди которых, в свою очередь, выделяются sc-узлы, sc-дуги и sc-ребра. В рамках технологии также предложено несколько универсальных вариантов визуализации конструкций SC-кода, таких как SCg-код (графический вариант), SCn-код (нелинейный гипертекстовый вариант) и SCs-код (линейный строковый вариант).

Каждая ostis-система состоит из полной семантической модели этой системы, описанной средствами SC-кода (sc-модели компьютерной системы), и платформы интерпретации sc-моделей, которая в общем случае может быть реализована как программно, так и аппаратно [22]. Таким образом обеспечивается полная платформенная независимость ostis-систем.

Принципы построения sc-моделей баз знаний и sc-моделей решения задач более подробно рассмотрены в работах [23, 24]. В основе sc-модели базы знаний лежат такие основные принципы, как выделение иерархической системы предметных областей и онтологий (включая онтологию представления и семейство онтологий верхнего уровня, которые входят в состав каждой разрабатываемой ostis-системы), а также выделение структур (знаков целых фрагментов базы знаний), которые могут быть впоследствии описаны в рамках этой же базы знаний. Использование этих и других принципов позволяет обеспечить в базе знаний возможность представления знаний различных видов, легкость внесения изменений в базу знаний, в том числе возможность расширения набора используемых видов знаний, структуризации базы знаний по произвольному набору признаков и представления в базе знаний метазнаний произвольного уровня.

В основе sc-модели решателя задач лежит принцип, согласно которому решатель трактуется как иерархическая система агентов, реагирующих на ситуации и события в sc-памяти (sc-агентов) и взаимодействующих между собой исключительно путем спецификации в sc-памяти информационных процессов, выполняемых соответствующими агентами. Подобные sc-агенты могут быть атомарными, т. е. такими, для которых явно указывается программа их действий, и неатомарными, которые декомпозируются на более простые sc-агенты. Классы функционально эквивалентных sc-агентов названы абстрактными sc-агентами. Каждый абстрактный sc-агент имеет соответствующую спецификацию, содержащую как минимум условие инициирования sc-агента и описание реализации sc-агента в зависимости от того, атомарный это sc-агент или неатомарный [25].

В рамках технологии OSTIS реализованы средства поддержки проектирования интеллектуальных систем (метасистема OSTIS, URL: <https://ims.ostis.net>) и средства редактирования модели базы знаний, рассматриваемые далее.

При проектировании адаптивных пользовательских интерфейсов ostis-систем для создания и редактирования семантической модели интерфейса используются такие средства, как редактор KBE (Knowledge Base source Editor, URL: <https://github.com/ostis-ai/kbe>) и онлайн-редактор SCg-кода (SCg-редактор), который является частью реализации интерпретатора sc-моделей пользовательских интерфейсов (URL: <https://github.com/ostis-ai/sc-web>).

КВЕ представляет собой приложение, которое направлено на помощь в создании и редактировании фрагментов баз знаний (фрагментов семантической модели) интеллектуальных систем, проектирование которых основано на технологии OSTIS. В основу данного редактора заложен принцип визуализации знаний, хранящихся в базе знаний ostis-системы, что намного упрощает процесс их редактирования и ускоряет проектирование баз знаний.

Пользовательский интерфейс инструмента содержит главное окно, в котором пользователь может создавать вкладки. В каждой вкладке возможно редактирование различных файлов исходных текстов баз знаний, представленных с помощью SCg-кода.

Основная идея, которая преследуется в КВЕ, – это упрощение и ускорение процесса редактирования семантической модели интеллектуальной системы.

В процессе редактирования пользователю доступны четыре режима:

*выделения и создания sc.g-узлов* – пользователь может работать со всеми объектами, выделяя и перемещая их, вызывая контекстное меню с командами;

*создания sc.g-дуг* – начинается с того, что пользователь указывает объект, из которого будет выходить дуга. Далее он может указать точки излома дуги, завершается создание указанием конечного объекта. В процессе создания пользователь может отменять последнее действие (указание начального объекта, точки излома);

*создания sc.g-шин* – используется для увеличения контактной площади узла, поэтому sc.g-шины могут создаваться лишь для sc.g-узлов. Создание шины начинается с указания sc.g-узла, далее, как и при создании sc.g-дуг, указываются точки излома. Пользователь может отменять последнее действие нажатием правой клавиши мыши;

*создания sc.g-контуров* – начинается с указания первой точки контура. Далее, как и в случае с sc.g-дугами и sc.g-шинами, указываются точки излома. Стоит отметить, что все объекты, которые попадут внутрь созданного контура, будут добавлены в него автоматически. Как и при создании дуг и шин, пользователь может отменять последнее действие [1].

Онлайн-редактор SCg-кода обладает схожим с КВЕ функционалом, но при этом позволяет редактировать семантическую модель в режиме реального времени при эксплуатации интеллектуальной системы и без создания файлов исходных текстов базы знаний.

Помимо четырех режимов редактирования, указанных для редактора КВЕ, SCg-редактор содержит также отдельный режим создания и редактирования файлов ostis-систем и имеет возможность сохранять изменения модели в базе знаний интеллектуальной системы.

Модель базы знаний пользовательского интерфейса была реализована с применением указанных средств. Так, семантическая модель компонентов пользовательского интерфейса описывает классификацию компонентов пользовательского интерфейса и связи между ними (рис. 1). Множество компонентов пользовательского интерфейса включает в себя множество компонентов пользовательского интерфейса для отображения, которое в свою очередь включает множество компонентов вывода.

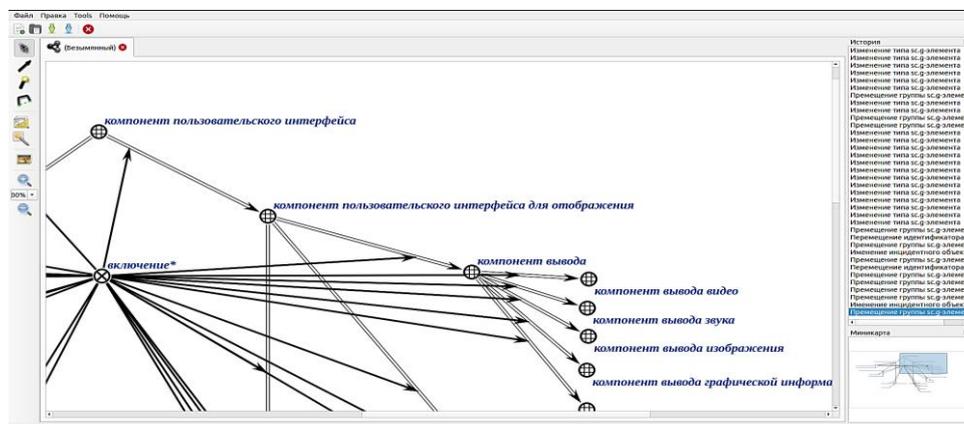


Рис. 1. Фрагмент семантической модели компонентов пользовательского интерфейса

Fig. 1. Fragment of the semantic model of user interface components

Детальное описание семантической модели адаптивного пользовательского интерфейса, его предметных областей и онтологий дано в работе [26]. Реализованная модель легко расширяется и модифицируется.

В рамках технологии OSTIS вводится понятие экосистемы OSTIS [27].

Экосистема OSTIS – это социотехническая сеть, которая представляет собой коллектив взаимодействующих самих ostis-систем, пользователей указанных ostis-систем (как конечных пользователей, так и разработчиков) и некоторых компьютерных систем, не являющихся ostis-системами (в качестве дополнительных информационных ресурсов или сервисов).

Задачами экосистемы OSTIS являются:

- оперативное внедрение всех согласованных изменений ostis-систем;
- перманентная поддержка высокого уровня взаимопонимания всех систем, входящих в экосистему OSTIS, и всех их пользователей;
- корпоративное решение различных сложных задач, требующих координации деятельности нескольких (чаще всего априори неизвестных) ostis-систем, а также, возможно, некоторых пользователей.

В рамках экосистемы OSTIS выделяется понятие персонального ostis-ассистента. Персональный ostis-ассистент – это ostis-система, являющаяся персональным ассистентом пользователя в рамках экосистемы OSTIS. Такая система предоставляет возможности:

- анализа деятельности пользователя и формирования рекомендаций по ее оптимизации;
- адаптации под настроение пользователя, его личностные качества, общую окружающую обстановку и задачи, которые чаще всего решает пользователь;
- перманентного обучения самого ассистента в процессе решения новых задач, при этом обучаемость потенциально не ограничена;
- ведения диалога с пользователем на естественном языке, в том числе в речевой форме;
- ответа на вопросы различных классов, при этом если системе что-то непонятно, то она сама может задавать встречные вопросы;
- автономного получения информации от всей окружающей среды, а не только от пользователя (в текстовой или речевой форме).

Пользовательский интерфейс персонального интеллектуального ассистента предоставляет пользователю средства управления его индивидуальной деятельностью, осуществляемой совместно с соответствующим ему персональным интеллектуальным ассистентом и обеспечивает унифицированный характер взаимодействия пользователей в рамках различных сообществ, в которые он входит. Простейшим видом сообществ является разовый диалог двух пользователей.

Поскольку взаимодействие пользователя с экосистемой OSTIS происходит только через персонального ostis-ассистента, пользовательский интерфейс экосистемы OSTIS для пользователя есть пользовательский интерфейс его персонального ostis-ассистента. Такой интерфейс должен быть адаптивным [28].

Модель пользователя и его действий в контексте пользовательского интерфейса экосистемы OSTIS необходимо хранить только в рамках персонального ostis-ассистента пользователя и обмениваться этими знаниями с другими ostis-системами по необходимости.

Проектирование пользовательского интерфейса основано на компонентном подходе. Любой компонент пользовательского интерфейса может быть описан в базе знаний ostis-системы. Пример компонента пользовательского интерфейса «калькулятор» с соответствующим ему фрагментом описания в базе знаний ostis-системы в SCg-коде показан на рис. 2.

Пользовательский интерфейс персонального ostis-ассистента по умолчанию содержит лишь компоненты интерфейса, необходимые пользователю для начала взаимодействия. При этом интерфейс постоянно адаптируется на основе модели пользователя и правил адаптации. Компоненты пользовательского интерфейса могут автоматически встраиваться в пользовательский интерфейс персонального ostis-ассистента в процессе эксплуатации системы. Ostis-системы, которые не являются персональными ostis-ассистентами, как правило, не должны иметь пользовательский интерфейс. Однако разработчики таких систем могут добавлять в базу знаний не-

обходимые компоненты пользовательского интерфейса, которые отображаются персональным ostis-ассистентом при взаимодействии с пользователем.

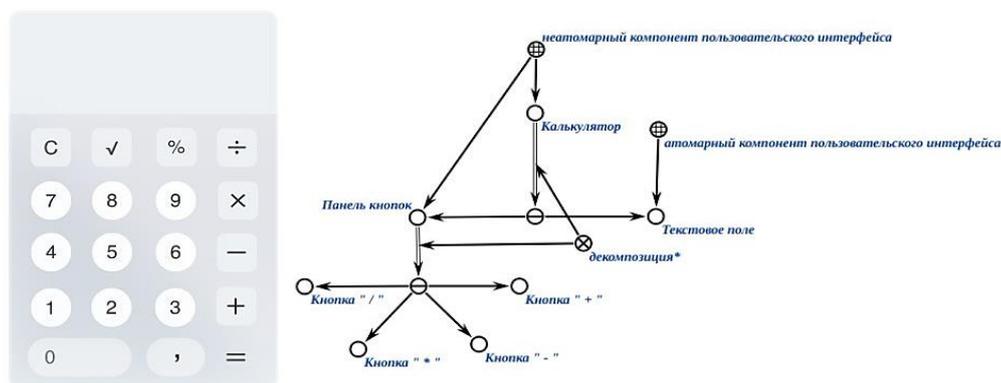


Рис. 2. Компонент «калькулятор» с соответствующим ему фрагментом описания в SCg-коде  
Fig. 2. The "calculator" component with its corresponding description fragment in the SCg-code

Так, общий процесс взаимодействия персонального ostis-ассистента с пользователем может быть описан следующим образом:

- пользователю отображается интерфейс персонального ostis-ассистента по умолчанию;
- при взаимодействии с пользователем интерфейс персонального ostis-ассистента автоматически адаптируется;
- персональный ассистент при взаимодействии с пользователем может использовать компоненты пользовательского интерфейса любой ostis-системы в рамках экосистемы OSTIS, адаптировать такой компонент и отображать пользователю при необходимости (рис. 3). Пользователь, его персональный ostis-ассистент и другие ostis-системы являются частью экосистемы OSTIS.

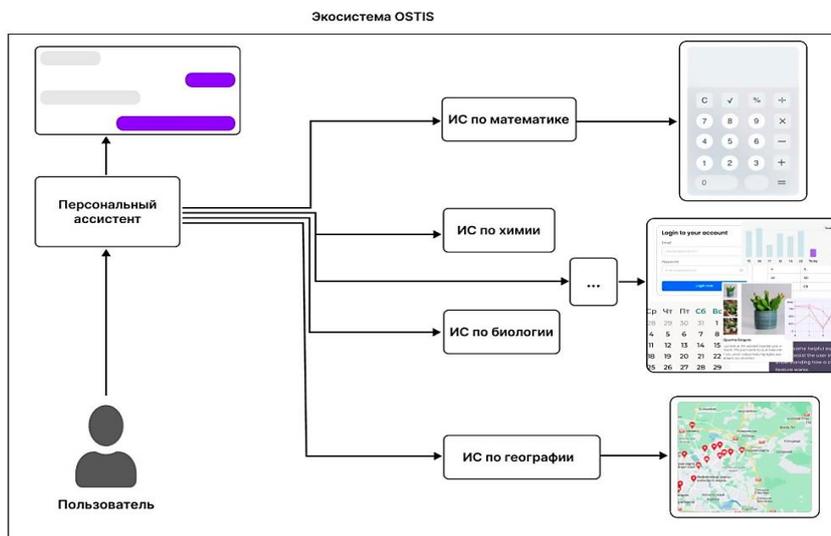


Рис. 3. Пример использования компонента пользовательского интерфейса в рамках экосистемы OSTIS  
Fig. 3. An example of user interface component usage within the OSTIS Ecosystem

Разработчик каждой интеллектуальной системы может описать необходимые для этой системы компоненты пользовательского интерфейса. В приведенном примере для системы по математике был описан компонент «калькулятор», для системы по географии – компонент «карты».

Поскольку пользователь взаимодействует со всеми ostis-системами только через персонального ostis-ассистента, ассистент сам обращается к нужной в текущий момент системе и встраивает необходимый компонент пользовательского интерфейса из некоторой прикладной ostis-системы в свою часть базы знаний с целью последующего отображения пользователю с учетом правил адаптации, которые также хранятся в базе знаний персонального ассистента.

Важно отметить, что большое разнообразие пользовательских интерфейсов влечет за собой разработку большого числа компонентов. В качестве многократно используемых компонентов интерфейсов ostis-систем могут выступать как уже спроектированные интерфейсы, так и специфицированные компоненты интерфейсов. Большое число многократно используемых компонентов интерфейсов ostis-систем создает проблему их хранения и поиска. Чтобы решить эту проблему, в технологии OSTIS применяются библиотека многократно используемых компонентов пользовательских интерфейсов ostis-систем и менеджер многократно используемых компонентов ostis-систем [29]. Применение библиотеки многократно используемых компонентов интерфейсов ostis-систем при проектировании интерфейса прикладной системы дает возможность значительно сократить сроки проектирования, а также снизить требования, предъявляемые к начальной квалификации разработчика. Это достигается за счет проектирования интерфейса из уже заранее подготовленных моделей интерфейса, что также позволяет повысить качество проектируемого интерфейса.

Уникальным свойством технологии OSTIS является обеспечение совместимости компонентов баз знаний, решателей задач и интерфейсов ostis-систем за счет единой унифицированной формальной основы.

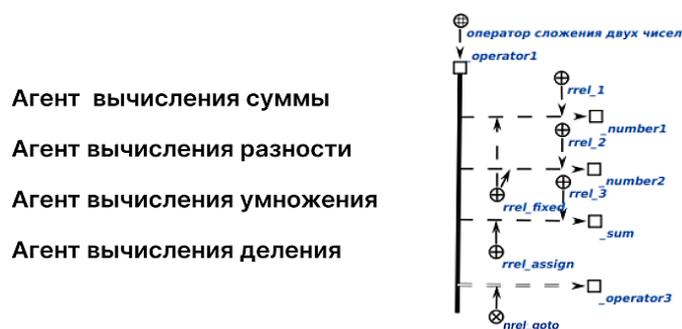


Рис. 4. Фрагмент представления оператора суммы двух чисел в базе знаний

Fig. 4. Fragment of the representation of the operator of the sum of two numbers in the knowledge base

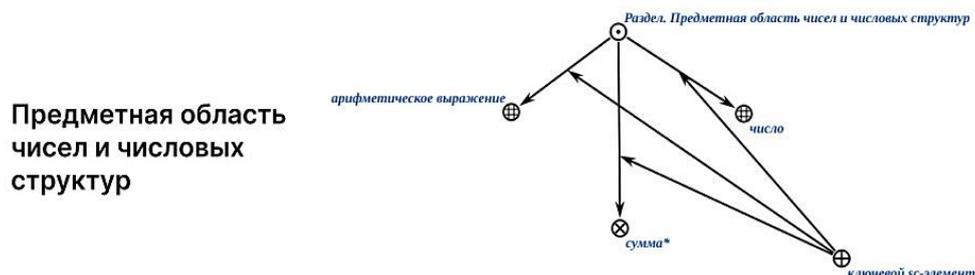


Рис. 5. Фрагмент предметной области чисел и числовых структур

Fig. 5. Fragment of the subject domain of numbers and numerical structures

Так, компонент пользовательского интерфейса зачастую для работы должен включать не только описание в базе знаний своих визуальных характеристик, но и компоненты решателя задач (sc-агенты), а также необходимые фрагменты некоторой предметной области. На рис. 2, 4 и 5 изображены фрагменты компонентов интерфейса, решателя задач и базы знаний соответственно для компонента пользовательского интерфейса «калькулятор». Данные фрагменты

включают оператор суммы двух чисел и фрагмент предметной области чисел и числовых структур, необходимые для работы компонента «калькулятор». За счет унифицированного представления всех необходимых частей такой компонент может быть легко интегрирован в любую *ostis*-систему, в том числе систему «персональный *ostis*-ассистент».

**Заключение.** В рамках исследования был рассмотрен переход от проектирования адаптированных пользовательских интерфейсов к проектированию АПИ. В качестве основы для проектирования АПИ интеллектуальных систем был предложен онтологический подход на основе семантической модели, предполагающий разработку формальной онтологии пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем. Предложенный подход позволяет упростить повторное (многократное) использование компонентов пользовательского интерфейса совместно с компонентами баз знаний и решателей задач как для отдельной интеллектуальной системы, так и для коллектива семантически совместимых интеллектуальных систем, обеспечить автоматизацию интеграции пользовательских интерфейсов и их адаптацию для каждого пользователя.

С целью апробации семантической модели АПИ интеллектуальных систем был разработан набор компонентов пользовательского интерфейса, включенных в библиотеку многократно используемых компонентов пользовательского интерфейса. В дальнейшем планируется расширение набора компонентов указанной библиотеки и их внедрение в коллектив семантически совместимых интеллектуальных систем.

#### Список использованных источников

1. Садовский, М. Е. Общие принципы организации интерфейсов *ostis*-систем / М. Е. Садовский // Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения / под общ. ред. В. В. Голенкова. – Минск, 2023. – Гл. 4.1. – С. 417–432.
2. Фомина, Т. А. Проектирование адаптивного интерфейса ИС для поддержки деятельности образовательного учреждения / Т. А. Фомина, Г. М. Новикова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020 – Т. 6, № 1. – С. 125–133. <https://doi.org/10.17513/vaael.1174>
3. *Ontology-based design of intelligent systems user interface* / A. S. Boriskin [et al.] // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2017) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 февр. 2017 г. / редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 95–106.
4. Белоусова, С. А. Анализ подходов к созданию пользовательского интерфейса / С. А. Белоусова, Ю. И. Рогозов // Изв. ЮФУ. Техн. науки. – 2014. – № 6(155). – С. 142–148.
5. *Model-based adaptive user interface based on context and user experience evaluation* / J. Hussain [et al.] // J. on Multimodal User Interfaces. – 2018. – Vol. 12. – P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12193-018-0258-2>
6. *UIML: An appliance-independent XML user interface language* / M. Abrams [et al.] // Proceedings of the 8th Intern. Conf. on the World Wide Web, Toronto, 11–14 May 1999. – Toronto, 1999. – P. 1695–1708.
7. *Limbourg, Q. USIXML: A user interface description language supporting multiple levels of independence* / Q. Limbourg, J. Vanderdonck // Engineering Advanced Web Applications : Proceedings of Workshops in Connection with the 4th Intern. Conf. on Web Engineering (ICWE 2004), Munich, Germany, 28–30 July 2004. – Munich, 2004. – P. 325–338.
8. *Van den Bergh, J. CAP3: Context-sensitive abstract user interface specification* / J. Van den Bergh, K. Luyten, K. Coninx // Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI Symp. on Engineering Interactive Computing Systems EICS '11, Pisa, Italy, 2011. – Pisa, 2011. – P. 31–40. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1996461.1996491>
9. *Paterno, F. Maria: A universal, declarative, multiple abstraction-level language for service-oriented applications in ubiquitous environment* / F. Paterno, C. Santoro, L. D. Spano // ACM Transactions on Computer-Human Interaction. – 2009. – Vol. 16, iss. 4. – P. 1–30. <https://doi.org/10.1145/1614390.1614394>
10. *Declarative interface models for user interface construction tools: the MASTERMIND approach* / P. Szekely [et al.] ; eds.: L. J. Bass, C. Unger // Engineering for Human-Computer Interaction. EHCI 1995. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Springer, Boston, MA, 1996. – P. 120–150. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-34907-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-34907-7_8)
11. *Liu, B. Deriving user interface from ontologies: A model-based approach* / B. Liu, H. Chen, W. He // 17th IEEE Intern. Conf. on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'05), Hong Kong, 14–16 Nov. 2005. – Hong Kong, 2005. – P. 254–259. <https://doi.org/10.1109/ICTAI.2005.55>
12. *Gaulke, W. Using profiled ontologies to leverage model driven user interface generation* / W. Gaulke, J. Ziegler // The 7th ACM SIGCHI Symp. on Engineering Interactive Computing Systems, Duisburg, 23–26 June 2015. – Duisburg, 2015. – P. 254–259. <https://doi.org/10.1145/2774225.2775070>

13. ActiveRaUL: Automatically generated Web interfaces for creating RDF data / A. Sahar [et al.] // Proceedings of the 12<sup>th</sup> Intern. Semantic Web Conf. (Posters & Demos Track), Sydney, 21–25 Oct. 2013. – Sydney, 2013. – P. 117–120.
14. Hitz, M. Using application ontologies for the automatic generation of user interfaces for dialog-based application / M. Hitz, T. Kessel // Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems. – 2016. – Vol. 268. – P. 16–31. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49944-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49944-4_2)
15. Грибова, В. В. Автоматизация разработки пользовательских интерфейсов с динамическими данными / В. В. Грибова, Н. Н. Черкезишвили // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2011) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–12 февр. 2011 г. / редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – С. 287–292.
16. Грибова, В. В. Генератор кода пользовательского интерфейса, управляемый онтологией / В. В. Грибова, А. В. Тарасов // Искусственный интеллект. – 2005. – Т. 4. – С. 457–464.
17. Hepp, M. Ontologies: State of the art, business potential, and grand challenges / M. Hepp // Ontology Management, Part of the Computing for Human Experience Book Series (ADSW, vol. 7). – Boston : Springer, 2008. – P. 3–22. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-69900-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-69900-4_1)
18. Beyond data models for automated user interface generation / A. R. Puetra [et al.] // People and Computers IX, Proceedings of HCI '94. – Glasgow, Aug. 1994. – P. 353–366.
19. Sadowski, M. The structure of next-generation intelligent computer system interfaces / M. Sadowski // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022) : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – Вып. 6. – С. 199–208.
20. Голенков, В. В. Открытая технология онтологического проектирования, производства и эксплуатации семантически совместимых гибридных интеллектуальных компьютерных систем / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина, Д. В. Шункевич. – Минск : Бестпринт, 2021. – 690 с.
21. Голенков, В. В. Проект открытой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем. Ч. 1: Принципы создания / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина // Онтология проектирования. – 2014. – № 1(11). – С. 42–64.
22. From training intelligent systems to training their development tools / V. V. Golenkov [et al.] // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2018) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 февр. 2018 г. / редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 81–98.
23. Davydenko, I. Semantic models, method and tools of knowledge bases coordinated development based on reusable components / I. Davydenko // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2018) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 февр. 2018 г. / редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 99–118.
24. Shunkevich, D. V. Agent-oriented models, method and tools of compatible problem solvers development for intelligent systems / D. V. Shunkevich // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2018) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 февр. 2018 г. / редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2018. – С. 119–132.
25. Principles of organization and automation of the semantic computer systems development / V. Golenkov [et al.] // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2019) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 февр. 2019 г. / редкол.: В. В. Голенков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 53–90.
26. Sadowski, M. Semantic-based design of an adaptive user interface / M. Sadowski // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems OSTIS-2021, Communications in Computer and Information Science. – Springer, Cham, 2022. – Vol. 1625. – P. 165–191. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7_10)
27. Zagorskiy, A. Principles for implementing the ecosystem of next-generation intelligent computer systems / A. Zagorskiy // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022) : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – Вып. 6. – С. 347–356.
28. Sadowski, M. User interface of the OSTIS Ecosystem / M. Sadowski // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2023) : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2023. – Вып. 7. – С. 153–158.

29. Orlov, M. Control tools for reusable components of intelligent computer systems of a new generation / M. Orlov // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2023) : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2023. – Вып. 7. – С. 191–206.

## References

1. Sadowski M. E. *General principles of organization of interfaces of ostis-systems*. Tehnologija kompleksnoj podderzhki zhiznennogo cikla semanticheski sovместimyh intellektual'nyh komp'yuternyh sistem novogo pokolenija [*Comprehensive Support Technology for the Life Cycle of Semantically Compatible Intelligent Computer Systems of a New Generation*]. In V. V. Golenkov. Minsk, 2023, chap. 4.1, pp. 417–432 (In Russ.).
2. Fomina T., Novikova G. *Designing an adaptive interface for an information system to support the activities of an educational institution*. Vestnik Altajskoj akademii jekonomiki i prava [*Bulletin of Altai Academy of Economics and Law*], 2020, vol. 6, no. 1, pp. 125–133. <https://doi.org/10.17513/vaael.1174> (In Russ.).
3. Boriskin A., Koronchik D., Zhukau I., Sadowski M., Khusainov A. *Ontology-based design of intelligent systems user interface*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh sistem : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 16–18 fevralja 2017 g. [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2017) : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, 16–18 February 2017*]. Ed. board: V. V. Golenkov, L. S. Globa, V. A. Golovko, N. A. Guljakina, O. P. Kuznecov, ..., V. F. Horoshevskij. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2017, pp. 95–106.
4. Belousova S., Rogozov Y. *Analysis of approaches to user interface creation*. Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki [*Proceedings of the Southern Federal University. Technical Science*], 2014, vol. 6(155), pp. 142–148 (In Russ.).
5. Hussain J., Hassan A., Hafiz S., Rahman A., Muhammad A., ..., Sungyoung L. Model-based adaptive user interface based on context and user experience evaluation. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2018, vol. 12, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12193-018-0258-2>
6. Abrams M., Phanouriou C., Batongbacal A., Williams S., Shuster J. UIML: An appliance-independent XML user interface language. *Proceedings of the 8th International Conference on the World Wide Web, Toronto, 11–14 May 1999*. Toronto, 1999, pp. 1695–1708.
7. Limbourg Q., Vanderdonck J. USIXML: A user interface description language supporting multiple levels of independence. *Proceedings of Workshops in Connection with the 4th International Conference on Web Engineering (ICWE 2004), Munich, Germany, 28–30 July 2004*. Munich, 2004, pp. 325–338.
8. Van den Bergh J., Luyten K., Coninx K. CAP3: Context-sensitive abstract user interface specification. *Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems EICS, Pisa, Italy, 2011*. Pisa, 2011, pp. 31–40. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1996461.1996491>
9. Paterno F., Santoro C., Spano L. D. Maria: A universal, declarative, multiple abstraction-level language for service-oriented applications in ubiquitous environment. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2009, vol. 16, iss. 4, pp. 1–30. <https://doi.org/10.1145/1614390.1614394>
10. Szekely P., Sukaviriya P., Castells P., Muthukumarasamy J., Salcher E. Declarative interface models for user interface construction tools: the MASTERMIND approach. In L. J. Bass, C. Unger (eds.). *Engineering for Human-Computer Interaction. EHCI 1995. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, Boston, MA, 1996, pp. 120–150. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-34907-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-34907-7_8)
11. Liu B., Chen H., He W. Deriving user interface from ontologies: A model-based approach. *17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'05), Hong Kong, 14–16 November 2005*. Hong Kong, 2005, pp. 254–259. <https://doi.org/10.1109/ICTAI.2005.55>
12. Gaulke W., Ziegler J. Using profiled ontologies to leverage model driven user interface generation. *The 7th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems, Duisburg, 23–26 June 2015*. Duisburg, 2015, pp. 254–259. <https://doi.org/10.1145/2774225.2775070>
13. Sahar A., Armin B., Shepherd H., Lexing L. ActiveRaUL: Automatically generated Web interfaces for creating RDF data. *Proceedings of the 12th International Semantic Web Conference (Posters & Demos Track), Sydney, 21–25 October 2013*. Sydney, 2013, pp. 117–120.
14. Hitz M., Kessel T. Using application ontologies for the automatic generation of user interfaces for dialog-based application. *Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems*, 2016, vol. 268, pp. 16–31. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49944-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49944-4_2)
15. Gribova V. V., Cherkezishvili N. N. *Automation of development of user interfaces with dynamic data*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh sistem : materialy Mezhdunarodnoj

nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 10–12 fevralja 2011 g. [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2011) : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, 10–12 February 2011*]. Ed. board: V. V. Golenkov, T. A. Gavrilova, V. A. Golovko, V. V. Gribova, N. A. Guljakina, ..., S. S. Shherbak. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2011, pp. 287–292 (In Russ.).

16. Gribova V. V., Tarasov A. V. *Ontology-driven user interface code generator*. *Iskusstvennyj intellekt [Artificial Intelligence]*, 2005, vol. 4, pp. 457–464 (In Russ.).

17. Hepp M. Ontologies: State of the art, business potential, and grand challenges. *Ontology Management, Part of the Computing for Human Experience Book Series (ADSW, vol. 7)*. Boston, Springer, 2008, pp. 3–22. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-69900-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-69900-4_1)

18. Puetra A. R., Eriksson H., Gennari J. H., Musen M. A. Beyond data models for automated user interface generation. *People and Computers IX, Proceedings of HCI '94*. Glasgow, August 1994, pp. 353–366.

19. Sadowski M. *The structure of next-generation intelligent computer system interfaces*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2022) : Research Papers Collection*]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2022, iss. 6, pp. 199–208.

20. Golenkov V. V., Guliakina N. A., Shunkevich D. V. *Open Technology of Ontological Design, Production, and Operation of Semantically Compatible Hybrid Intelligent Computer Systems*. Minsk, Bestprint, 2021, 690 p.

21. Golenkov V. V., Guliakina N. A. *An open semantic technology project for component-based design of intelligent systems. Part 1: Principles of creation*. *Ontologija proektirovanija [Design Ontology]*, 2014, no. 1(11), pp. 42–64.

22. Golenkov V. V., Guliakina N. A., Grakova N. V., Davydenko I. T., Nikulenk V. Y., ..., Tarasov V. B. *From training intelligent systems to training their development tools*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 15–17 fevralja 2018 g. [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2018) : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, 15–17 February 2018*]. Ed. board: V. V. Golenkov, T. A. Gavrilova, V. A. Golovko, P. S. Grabust, N. A. Guljakina, ..., A. A. Sharipbaj. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2018, pp. 81–98.

23. Davydenko I. *Semantic models, method and tools of knowledge bases coordinated development based on reusable components*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 15–17 fevralja 2018 g. [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2018) : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, 15–17 February 2018*]. Ed. board: V. V. Golenkov, T. A. Gavrilova, V. A. Golovko, P. S. Grabust, N. A. Guljakina, ..., A. A. Sharipbaj. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2018, pp. 99–118.

24. Shunkevich D. V. *Agent-oriented models, method and tools of compatible problem solvers development for intelligent systems*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 15–17 fevralja 2018 g. [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2018) : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, 15–17 February 2018*]. Ed. board: V. V. Golenkov, T. A. Gavrilova, V. A. Golovko, P. S. Grabust, N. A. Guljakina, ..., A. A. Sharipbaj. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2018, pp. 119–132.

25. Golenkov V. V., Shunkevich D., Davydenko I. T., Grakova N. V. *Principles of organization and automation of the semantic computer systems development*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 21–23 fevralja 2019 g. [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2019) : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, 21–23 February 2019*]. Ed. board: V. V. Golenkov, Gavrilova T. A., V. A. Golovko, P. S. Grabust, N. A. Guliakina, ..., A. A. Sharipbay. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2019, pp. 53–90.

26. Sadowski M. *Semantic-based design of an adaptive user interface*. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems OSTIS-2021, Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2022, vol. 1625, pp. 165–191. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7_10)

27. Zagorskiy A. *Principles for implementing the ecosystem of next-generation intelligent computer systems*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2022) : Research Papers Collection*].

Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2022, iss. 6, pp. 347–356.

28. Sadowski M. *User interface of the OSTIS Ecosystem*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2023) : Research Papers Collection*]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2023, iss. 7, pp. 153–158.

29. Orlov M. *Control tools for reusable components of intelligent computer systems of a new generation*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh system : sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2023) : Research Papers Collection*]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2023, iss. 7, pp. 191–206.

### Информация об авторе

*Садовский Михаил Ефимович*, исследователь технических наук, кафедра интеллектуальных информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.  
E-mail: [sadovski@bsuir.by](mailto:sadovski@bsuir.by)  
<https://orcid.org/0000-0003-0699-8388>

### Information about the author

*Mikhail E. Sadowski*, Researcher of Technical Sciences, the Department of Intelligent Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.  
E-mail: [sadovski@bsuir.by](mailto:sadovski@bsuir.by)  
<https://orcid.org/0000-0003-0699-8388>



УДК 004.032.26, 004.822.2  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-90-105>

Оригинальная статья  
Original Paper

## Семантические модели и средства разработки искусственных нейронных сетей и их интеграции с базами знаний

М. В. Ковалёв

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь  
E-mail: kovalev@bsuir.by*

### Аннотация

**Цели.** Предлагаются спецификации моделей и средств разработки искусственных нейронных сетей (ИНС) и их интеграции с базами знаний интеллектуальных систем. Актуальность исследования определяется необходимостью решения комплексных задач интеллектуальными системами, алгоритм и методы решения которых отсутствуют в базах знаний интеллектуальных систем.

**Методы.** Анализируются четыре уровня интеграции ИНС с базами знаний. В ходе анализа формулируются требования и спецификации к необходимым моделям и средствам разработки и интеграции. Специфицированные на каждом уровне модели и средства включают в себя модели и средства предыдущего уровня. Применение средств рассмотрено на примере решения задачи классификации сущностей базы знаний с помощью графовой нейронной сети.

**Результаты.** Разработаны спецификации модели представления ИНС в базе знаний, агентно-ориентированной модели разработки и интерпретации ИНС, обеспечивающие интеграцию ИНС в базы знаний на всех выделенных уровнях, а также метод классификации сущностей базы знаний с помощью графовой нейронной сети.

**Заключение.** Предложенные модели и средства позволяют интегрировать в базу знаний интеллектуальной системы любые обученные ИНС и использовать их для решения комплексных задач в рамках технологии OSTIS. Становятся возможными проектирование и обучение ИНС на основании как внешних данных, так и фрагментов базы знаний, а также автоматизация процесса разработки ИНС в базе знаний.

**Ключевые слова:** интеграция, методы решения задач, искусственные нейронные сети, графовые нейронные сети, базы знаний, онтологии

**Для цитирования.** Ковалёв, М. В. Семантические модели и средства разработки искусственных нейронных сетей и их интеграции с базами знаний / М. В. Ковалёв // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 90–105. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-90-105>

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 12.07.2023

Подписана в печать | Accepted 01.08.2023

Опубликована | Published 29.09.2023

# Semantic models and tools for the development of artificial neural networks and their integration into knowledge bases

Mikhail V. Kovalev

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus  
E-mail: kovalev@bsuir.by*

## Abstract

**Objectives.** Specifications of models and tools for the development of artificial neural networks (ANNs) and their integration into knowledge bases (KBs) of intelligent systems are being developed. The relevance is determined by the necessity of implementing the possibility to solve complex problems by intelligent systems, which algorithms and methods of solving are not available in the knowledge base of the intelligent system.

**Methods.** Four levels of integration of artificial neural networks into knowledge bases are formulated and analyzed. During the analysis the requirements and specifications for required models and tools for the development and integration are formulated. Specified at each level the models and tools include the models and tools of previous level. The application of the tools is considered by the example of solving the problem of classifying the knowledge base entities using a graph neural network.

**Results.** The specifications of the ANN representation model in the knowledge base, the agent-based model for the development and interpretation of the ANN, which ensures the integration of the ANN into knowledge bases at all selected levels, as well as the method for classifying knowledge base entities using a graph neural network, have been developed.

**Conclusion.** The developed models and tools allow integrating any trained ANNs into the knowledge base of the intelligent system and using them to solve complex problems within the framework of OSTIS technology. It also becomes possible to design and train ANNs both on the basis of external data and on the basis of fragments of the knowledge base. Automation of ANNs development process in the knowledge base becomes available.

**Keywords:** integration, problem-solving methods, artificial neural networks, graph neural networks, knowledge bases, ontologies

**For citation.** Kovalev M. V. *Semantic models and tools for the development of artificial neural networks and their integration into knowledge bases*. *Informatika [Informatics]*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 90–105 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-90-105>

**Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

**Введение.** В настоящее время продолжается активное совершенствование отдельных интеллектуальных методов решения задач. Отлично показали себя большие языковые модели [1, 2], генеративные нейронные сети [3], технологии построения и внедрения графов знаний [4]. Однако с развитием искусственного интеллекта (ИИ) становится все более явной потребность в эффективной интеграции различных методов решения задач. Это вызвано необходимостью создания более гибких и адаптивных интеллектуальных систем, способных решать сложные задачи и эффективно использовать имеющиеся знания и данные. Такие системы должны использовать интеллектуальные методы решения задач в самых различных комбинациях и последовательностях, не всегда заранее известных проектировщикам интеллектуальных систем. Появились целые междисциплинарные подходы [5, 6], призванные объединить в себе преимущества двух традиционных направлений ИИ: коннекционистского и символического.

Одной из основных проблем, стоящих перед исследователями и разработчиками в области ИИ, является определение оптимальных стратегий интеграции различных методов решения задач, как интеллектуальных, так и традиционных. Обилие комплексных задач (задач, решение которых невозможно с помощью одной модели решения задач, одного вида знаний, одной интеллектуальной компьютерной системы) порождает многообразие архитектур интеллектуальных систем, призванных решать задачи из какого-то ограниченного набора классов задач с помощью фиксированного набора методов их решения. Отсутствие унификации подходов к интеграции методов решения задач в интеллектуальные системы делает затруднительным повтор-

ное использование этих методов в других интеллектуальных системах. Отдельные же комплексные задачи [7] в принципе не могут быть решены без унифицированного подхода к интеграции и интерпретации методов решения задач. Именно такими задачами являются: проектирование ИНС, обучение и дообучение ИНС, верификация работы ИНС в реальном времени на основании описания задачи и ее контекста.

Целью настоящего исследования является спецификация моделей и средств разработки (проектирования и обучения) и интеграции ИНС с базами знаний (БЗ) интеллектуальных систем. Под спецификацией сущности подразумевается описание синтаксической, денотационной и операционной семантики понятий, необходимых для формализации данной сущности в БЗ, а также связи этой сущности с другими сущностями. Обоснование того, почему речь идет об интеграции с БЗ, будет дано во втором разделе. В соответствии с поставленной целью можно выделить следующие задачи исследования:

- анализ современных подходов к интеграции интеллектуальных методов решения задач с БЗ;
- формулирование требований к моделям и средствам разработки ИНС и их интеграции с БЗ;
- специфицирование моделей разработки ИНС и их интеграции с БЗ;
- специфицирование средств разработки ИНС и их интеграции с БЗ.

Исследование построено следующим образом. Выделены четыре уровня интеграции ИНС, каждый уровень включает в себя предыдущий. При описании каждого уровня уточняются спецификации целевых моделей и средств. Выделены следующие уровни:

- ручной интеграции;
- интеграции на основании унификации интерфейсов использования;
- интеграции на основании унификации интерфейсов построения;
- конвергенции.

На последнем уровне специфицированы целевые модели и средства, дающие наиболее глубокий уровень интеграции и покрывающие наибольшее количество классов задач, решаемых интеллектуальными системами с помощью ИНС.

**1. Уровень ручной интеграции.** Большинство современных интеллектуальных систем интегрируют различные интеллектуальные методы решения задач, в том числе ИНС, как черные ящики, разрабатывая специализированные интерфейсы и средства взаимодействия с каждым отдельным методом.

До недавнего времени интеллектуальные системы интегрировали в себе отдельные методы ИИ для решения узкого круга задач. Зачастую подобные интеграции сводятся к подключению некоторых ИИ-модулей к традиционным системам. Примером такой интеграции является добавление ИИ чат-ботов [8], модулей распознавания и синтеза речи [9], моделей компьютерного зрения [10] и т. д. Между тем в последние годы исследуются и разрабатываются системы, способные интегрировать в себе несколько методов ИИ в одной системе. В первую очередь речь идет о системах, интегрирующих в себе ИНС и БЗ, которые в зарубежных публикациях все чаще называются графами знаний [4].

Можно выделить следующие подходы к подобным интеграциям:

1. ИНС как сенсор интеллектуальной системы, основанной на БЗ [11, 12]. При данном подходе ИНС извлекают информацию из входных данных (текста, звука, изображения) и транслируют ее в БЗ, где эта информация используется для решения задач.

2. В БЗ интеллектуальной системы происходят обработка и верификация обучающих выборок и выходных данных ИНС [13, 14]. В современных задачах, решаемых с помощью ИНС, постоянно растут требования к уровню учета семантики в решении. Принимая во внимание особенности ИНС, уровень учета семантики поднимается за счет поиска логических и семантических противоречий в обучающих и выходных данных ИНС. В случае выявления подобных противоречий в выходных данных в процессе обучения ИНС становится возможной корректировка методов обучения ИНС.

3. ИНС обрабатывают и генерируют фрагменты БЗ. Активно развивается подход, получивший серьезный толчок к развитию благодаря внедрению графовых ИНС, способных принимать на вход графовые структуры. С помощью таких сетей предсказываются отношения в БЗ [15], классифицируются и кластеризуются фрагменты БЗ [16].

4. В БЗ хранятся логические правила, которые соответствуют конкретным нейронным элементам или слоям ИНС [17, 18]. Данный подход называется объясняющим ИИ (explainable AI) и призван решить классическую проблему ИНС – проблему «черного ящика» [19]. ИНС обучаются на исторических данных, они не способны объяснить, почему выдали тот или иной результат. Даже на шумевшие в последнее время большие языковые модели не способны объяснить, почему они выдали тот или иной результат [20], и даже если попросить их это сделать, они выдадут правдоподобные, но не истинные причины своих результатов. Суть подхода «объясняющий ИИ» к решению этой проблемы состоит в попытке сгенерировать правдоподобные логические правила, которые ставятся в соответствие этапам вычисления внутри ИНС. При работе ИНС оцениваются те этапы вычислений, которые наибольшим образом повлияли на результат, и строится цепочка логических правил, объясняющая его.

Все задачи, решаемые перечисленными подходами, безусловно, актуальны, однако зачастую их решения являются узконаправленными, сосредоточенными на конкретной проблеме из некоторой предметной области. Нейросетевые и семантические методы решения задач используются в четко заданной последовательности, вручную интегрируются между собой и не нацелены на решение комплексных задач произвольной формулировки. На рис. 1 показан пример схемы взаимодействия ИИ-модулей, интегрированных с решателем задач на ручном уровне.



Рис. 1. Схема взаимодействия решателя задач с ИИ-модулями на уровне ручной интеграции

Fig. 1. Scheme of interaction of the problem solver with AI modules at the level of manual integration

**2. Уровень интеграции на основании унификации интерфейсов использования.** Решение комплексных задач подразумевает:

1. Автоматическое разбиение задачи на подзадачи. Задается декларативная формулировка комплексной задачи, на основании которой системе необходимо выделить декларативную формулировку подзадач.

2. Поиск методов решения каждой подзадачи. В системе хранятся спецификации различных методов решения задач, в которых описаны класс решаемых задач, тип входных данных и т. п. На основании этих спецификаций система подбирает метод решения каждой подзадачи.

3. Использование найденных методов. Успешное решение всех подзадач обеспечивает успешное решение исходной задачи.

4. Описание решения исходной задачи как последовательности решения подзадач.

Исходя из описанных шагов, можно выделить минимальные требования к системам, обеспечивающим интеграцию различных методов решения задач:

- наличие унификации представления и согласованность различных видов знаний, описывающих задачи, контекст задач и методы их решения;
- наличие моделей и средств по разбиению задач на подзадачи;

– способность объяснить свои решения на уровне описания формулировок подзадач и последовательности их решения.

Интересный подход к решению комплексных задач и интеграции в себе различных методов их решения представлен в проекте ChatGPT (URL: <https://openai.com/blog/chatgpt>) и его системе плагинов (URL: <https://openai.com/blog/chatgpt-plugins>). ChatGPT является большой языковой моделью, способной решать комплексные задачи, формулировки и контекст которых сформулированы на естественном языке. Основным методом решения этих задач является сама большая языковая модель, однако система плагинов к данной модели позволяет ей использовать различные методы решения задач.

Плагин к ChatGPT представляет собой открытый сервис, предоставляющий некоторое API. Спецификация API задается в структурированном формате, в котором описываются типы входных данных для каждой точки доступа и ее суть на естественном языке (URL: <https://platform.openai.com/docs/plugins/getting-started/openapi-definition>). Когда пользователь задает вопрос, модель может выбрать вызов API из некоторого плагина, если спецификация этого API близка к контексту решаемой задачи. Вызов API пополняет контекст решаемой задачи и повышает уровень вероятности того, что сгенерированный ответ решит задачу пользователя. К примеру, плагин может возвращать ссылки на интернет-источники (URL: <https://gptstore.ai/plugins/-simbiss-net>), чего по умолчанию сама модель делать не может.

Так как формулировка задачи, контекст и описание методов ее решения частично задаются на естественном языке, то можно говорить о выполнении первого из трех сформулированных требований. С небольшими оговорками можно говорить о выполнении и второго требования, так как модель пополняет контекст поставленной задачи на основании разбиения формулировки поставленной задачи на подзадачи. К примеру, из запроса «Найди ссылку на исследование по ИНС и дай ему свою оценку» система сможет выделить ключевое слово «ссылка» и воспользоваться плагином по поиску ссылок в Интернете.

Между тем на данный момент модель не может объяснить, какие подзадачи были выделены и как их решение повлияло на решение исходной задачи. Плагины пополняют контекст решаемой задачи, который отправляется на вход большой языковой модели, объяснить ответ которой уже нельзя. В результате можно говорить о неудовлетворении последнего требования.

Другой подход к интеграции различных методов решения задач основан на формальном представлении знаний, описывающих контекст задач и методы их решения. Данный подход лежит в основе технологии OSTIS [21], с помощью которой проектируются и реализуются ostis-системы – интеллектуальные системы, решающие комплексные задачи на основании унификации знаний и методов решения задач.

В качестве формальной основы для представления знаний в рамках технологии OSTIS используется унифицированная семантическая сеть с теоретико-множественной интерпретацией. Такая модель представления названа SC-кодом (semantic computer code) [21]. Элементы семантической сети названы sc-узлами и sc-коннекторами (sc-дугами, sc-ребрами).

Любая ostis-система состоит из БЗ, решателя задач и пользовательского интерфейса (рис. 2).



Рис. 2. Архитектура ostis-системы

Fig. 2. Architecture of the ostis-system

Основу БЗ, построенной по технологии OSTIS, составляет иерархическая система предметных областей (ПрО) и соответствующих им онтологий. Онтологии содержат описания понятий, необходимые для формализации знаний из соответствующей этой онтологии ПрО. Любое знание, описывающее некоторую задачу, ее контекст и спецификацию методов решения, можно представить в виде конструкций SC-кода. Таким образом, обеспечивается унификация представления и согласованность различных видов знаний, описывающих задачи, их контекст и методы решения.

Решатель задач занимается обработкой фрагментов БЗ. На операционном уровне обработка сводится к добавлению, поиску, редактированию и удалению sc-узлов и sc-коннекторов БЗ. На семантическом уровне такая операция является действием, выполняемым в памяти субъекта действия, где в общем случае субъектом служит ostis-система, а БЗ – ее памятью. Действие определяется как процесс воздействия одной сущности (или некоторого множества сущностей) на другую сущность (или на некоторое множество других сущностей) согласно некоторой цели.

Действия выполняются агентами в соответствии с поставленными задачами. Задача – это формальная спецификация некоторого действия, достаточная его для выполнения каким-либо субъектом. В зависимости от конкретного класса задач описываться может как внутреннее состояние самой интеллектуальной системы, так и требуемое состояние внешней среды [21]. Схожие задачи объединены в классы, для которых заданы обобщенные формулировки задач. В работе [22] приведены классы задач, решаемых ИНС.

Решатель задач ostis-системы имеет модели и средства по разбиению задач на подзадачи и способен объяснить свои решения на уровне описания формулировок подзадачи и последовательности их решения. При решении задачи решатель задач разбивает ее на подзадачи с явным описанием формулировки каждой подзадачи, ищет метод ее решения и применяет его.

Таким образом, системы, построенные по принципам технологии OSTIS, удовлетворяют всем трем выдвинутым требованиям. Поэтому в рамках предлагаемого подхода описываются модели и средства разработки ИНС и их интеграции в БЗ с помощью технологии OSTIS.

В соответствии с архитектурой ostis-систем для интеграции ИНС в интеллектуальную систему необходимо описать:

- модель представления ИНС в БЗ;
- агентно-ориентированную модель разработки и интерпретации ИНС;
- библиотеку многократно используемых компонентов по разработке и интерпретации ИНС, а также библиотеку уже разработанных ИНС.

С точки зрения ostis-систем ИНС является методом решения задач. Метод решения задач определяется как программа решения задач соответствующего класса, которая может быть и процедурной, и декларативной. В свою очередь, класс методов решения задач определяется как множество всевозможных методов решения задач, имеющих общий язык представления этих методов. Язык представления методов позволяет описывать синтаксическую, денотационную и операционную семантику этих методов. Для того чтобы добавить в арсенал технологии OSTIS такой метод решения задач, как ИНС, и тем самым расширить круг задач, решаемых ostis-системами, необходимо описать синтаксис, денотационную и операционную семантику языка представления ИНС. Синтаксис языка представления ИНС является синтаксисом SC-кода, использующимся в технологии OSTIS для представления знаний.

Денотационная семантика языка представления ИНС описывается в рамках модели представления ИНС в БЗ, которая сводится к описанию ПрО и соответствующей ей онтологии ИНС.

На уровне интеграции по входам и выходам в рамках данной ПрО содержатся те знания о готовых к использованию ИНС, которые необходимы решателю задач для принятия решения об использовании той или иной ИНС. Такими знаниями являются:

- тип входных данных;
- множество распознаваемых классов или тип выходных данных;
- класс задач, решаемых ИНС;
- архитектура;

- среднее время работы;
- метрики эффективности.

Соответствующие понятия уже определены в рамках работы [22]. На рис. 3 изображена частичная спецификация обученной ИНС [12], описанной с помощью предлагаемой модели представления ИНС. Данная ИНС построена на основании архитектуры eXnet [23] и решает задачу классификации эмоций.

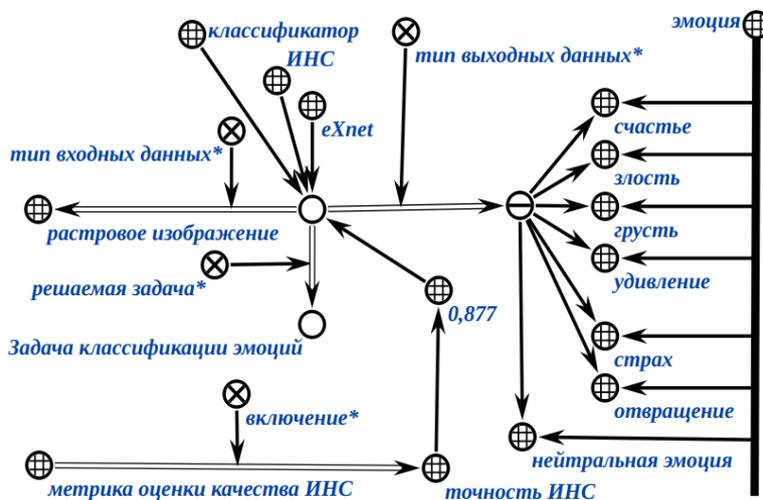


Рис. 3. Частичная спецификация обученной ИНС по распознаванию эмоций

Fig. 3. Partial specification of a trained ANN for emotion recognition

Операционной семантикой любого языка представления методов решения задач является спецификация семейства агентов, обеспечивающих интерпретацию (использование) любого метода, принадлежащего соответствующему классу методов. Это семейство служит интерпретатором соответствующего метода решения задач. В рамках технологии OSTIS такой интерпретатор называется моделью решения задач. Так как в рамках технологии OSTIS используется многоагентный подход, то разработка модели решения задач с помощью ИНС сводится к разработке агентно-ориентированной модели разработки и интерпретации ИНС. Согласно многоагентному подходу каждый агент выполняет некоторое действие в sc-памяти. Следовательно, модель задается иерархией специфицированных действий и соответствующей этим действиям иерархией агентов. На рассматриваемом уровне интеграции можно выделить только одно действие – по интерпретации ИНС, интегрированной по входам и выходам. Такому действию соответствует семейство агентов, каждый из которых вызывается решателем задач в случае выбора некоторой описанной в БЗ ИНС, представленной на том сервисе, за интеграцию с которым отвечает данный агент. Вызываемому агенту передается узел, обозначающий соответствующую ИНС, и входные данные, тип которых определяется по описанию ИНС.

Все агенты, реализующие операционную семантику языка представления ИНС, а также конкретные ИНС, описанные и интегрированные в ostis-систему, являются частью библиотеки многократно используемых компонентов по работе с ИНС.

Описанные модели и средства будут уточняться по мере рассмотрения более глубоких уровней интеграции.

**3. Уровень интеграции на основании унификации интерфейсов построения.** Данный уровень интеграции позволяет не только интерпретировать готовые ИНС, но и выполнять такие действия по разработке ИНС, как проектирование и обучение.

В памяти ostis-системы хранятся знания о том, ИНС какого класса могут решить задачу заданного класса, но необходимый экземпляр класса ИНС может не быть представлен в системе. В этом случае система должна иметь возможность сообщить пользователю о необходимости разработки ИНС для решения поставленной задачи. Так как система хранит в единой памяти

задачу и требования к методу ее решения, появляется возможность разработать необходимый метод задачи решения.

В итоге становится возможным в ходе решения некоторой задачи не только использовать готовые ИНС, но и проектировать и обучать специализированные ИНС для решения текущей задачи. Такие проектирование и обучение могут осуществляться системой самостоятельно, когда в БЗ описаны либо все необходимые для этого знания (выборка, критерии обучения, спецификация входов и выходов и т. д.), либо источники подобных знаний, к которым система может обращаться самостоятельно. В случае когда таких возможностей нет, система может обращаться к разработчикам для пополнения БЗ необходимыми знаниями. К примеру, для решения задачи система может попросить разработчика предоставить обучающую выборку в требуемом формате.

На рассматриваемом уровне интеграции появляется принципиально новый класс задач по обучению ИНС обработке фрагментов БЗ. Соответственно, обучающая выборка также может состояться из фрагментов БЗ. В рамках исследования данного класса задач был разработан метод классификации сущностей БЗ. Постановка задачи сформулирована следующим образом: классифицировать сущности БЗ на основании их семантической окрестности. Метод описывается на примере классификации понятий онтологий. Такая задача является одной из подзадач задачи автоматического пополнения построения онтологий для диалоговой системы, управляемой знаниями и поддерживающей диалог на свободную тему [24]. Основным требованием к диалоговой системе является необходимость поддерживать диалог в рамках любой предметной области, а не только в рамках тех, которые предварительно формализованы разработчиками. К примеру, когда пользователь сообщил системе: «Я умею разрабатывать системы на C++», то система должна протранслировать эти знания, несмотря на то, что изначально в ее БЗ не содержалось предметных областей и онтологий о программировании. Таким образом, появилась необходимость решения задачи автоматического построения онтологий.

Выяснилось, что большие языковые модели при правильной настройке могут неплохо выделять смысл сообщений в виде троек: <пользователь, разрабатывать, система>, <пользователь, разрабатывать на, C++>, <C++, есть, язык программирования>, <разрабатывать, есть, навык> и т. д. Однако для того чтобы протранслировать такие тройки в SC-код, нужно выделить из них понятия и экземпляры. Если понятий еще нет в БЗ, то нужно их классифицировать, чтобы понять, к какой онтологии их отнести и каким образом использовать для формализации сообщений пользователя в будущем. К примеру, понятие «язык программирования» является абсолютным и обозначает множество, содержащее известные системе языки программирования, а понятие «разрабатывать» является неролевым отношением, связывающим разработчика и систему.

Выделяются следующие целевые классы:

- абсолютное понятие (`sc_node_not_relation`);
- ролевое отношение (`sc_node_role_relation`);
- неролевое отношение (`sc_node_norole_relation`).

В качестве БЗ использовалась мета-система OSTIS (URL: <https://ims.ostis.net>).

На рис. 4 представлена семантическая окрестность понятий, принадлежащих целевым классам.

Для решения задачи классификации сущностей в БЗ использовалась графовая нейронная сеть (Graph Neural Network, GNN) CapsGNN [25]. GNN – это семейство нейронных сетей, которые могут естественным образом работать с данными, структурированными на основе графа. Каждому элементу графа (вершине или ребру) ставится в соответствие некоторый эмбединг – вектор фиксированной размерности, характеризующий элемент графа. Каждый слой GNN преобразует эти эмбединги по некоторым правилам, которые учитывают эмбединги соседних элементов графа. Из эмбедингов элементов графа высчитывается эмбединг всего графа.

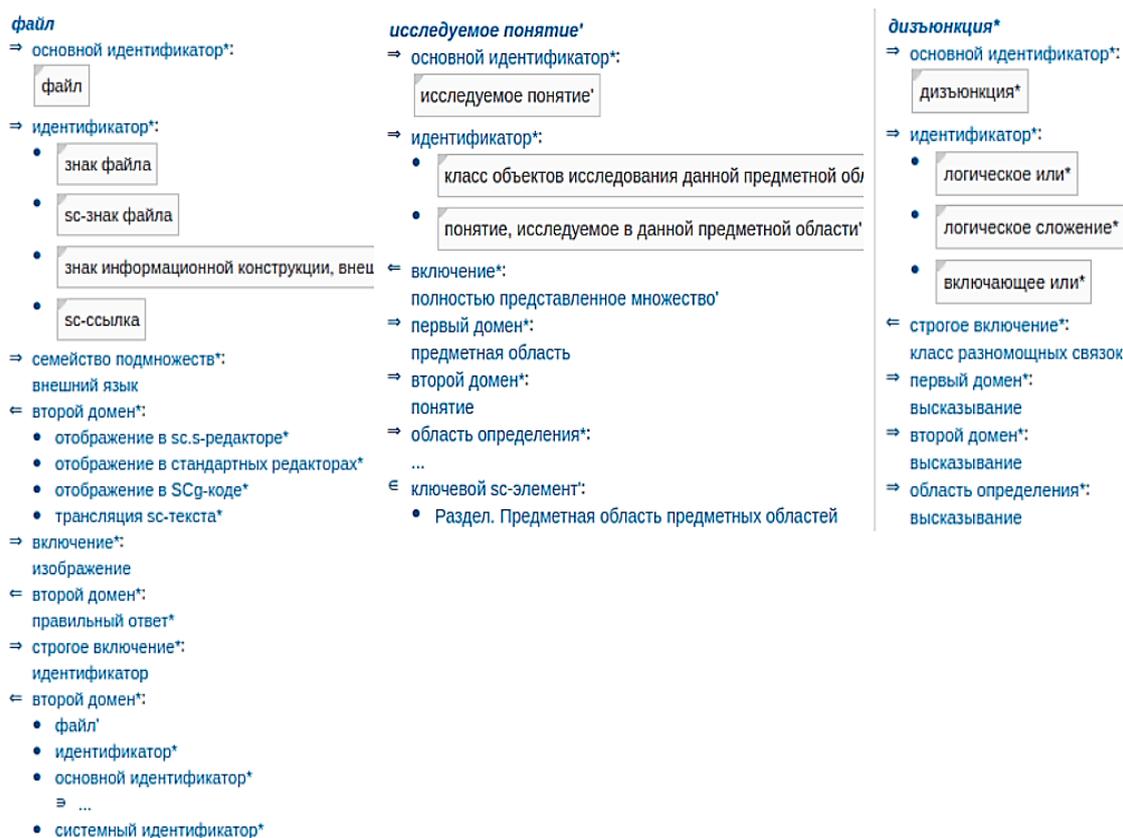


Рис. 4. Семантическая окрестность понятий целевых классов

Fig. 4. Semantic neighborhood of target class concepts

SC-код не является классическим графом, на работу с которым ориентирована сеть CapsGNN. С точки зрения теории графов SC-код – это неклассический граф, в котором началом и концом дуг (ребер) могут выступать не только вершины, но и другие дуги (ребра). Поэтому был разработан алгоритм преобразования SC-кода в классический граф, суть которого состоит в замене инцидентности между дугами на вершину графа. На рис. 5 показан пример преобразования фрагмента SC-кода в классический граф в несколько этапов:

- в ходе преобразования состояния 1 в 2 выполняется замена общей дуги на связку с явным указанием первого и второго элемента этой связки;
- в ходе преобразования состояния 2 в 3 выполняется удаление инцидентности между дугами путем ввода новой вершины графа в месте инцидентности дуг;
- в ходе преобразования состояния 3 в 4 выполняются нумерация вершин полученного графа и подстановка в соответствие каждой вершине вектора с одним элементом – номером типа sc-элемента.

В ходе исследования в качестве начального эмбединга вершин получившегося графа рассматривались следующие характеристики:

- количество исходящих дуг;
- количество входящих дуг;
- расстояние до понятий онтологии верхнего уровня;
- номер типа sc-элемента (в зависимости от того, является ли sc-элемент узлом или дугой, обозначает отношение, класс, структур, связку или что-то еще, sc-элементу присваиваются разные номера);
- различные сочетания вышперечисленного.

В результате перебора наилучшим классифицирующим признаком был выбран номер типа sc-элемента.

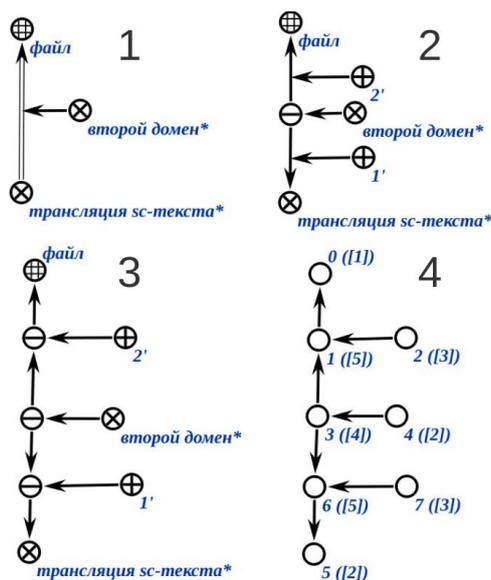


Рис. 5. Преобразование фрагмента SC-кода в классический граф

Fig. 5. Converting a fragment of SC-code into a classical graph

В рамках исследования также решалась задача выбора той части семантической окрестности понятия, которая наиболее характерна для класса данного понятия. В качестве такой части рассматривались:

- множества, в которых состоит понятие, с указанием его роли;
- элементы, которые принадлежат понятию, с указанием его роли;
- исходящие неролевые отношения с другими sc-элементами;
- входящие неролевые отношения с другими sc-элементами;
- различные сочетания вышеперечисленного.

Наилучшие результаты были получены при использовании той части семантической окрестности понятия, которая описывает входящие неролевые отношения с другими sc-элементами.

В таблице представлены результаты обучения CapsGNN, их можно назвать приемлемыми для решения поставленной задачи. Точность обучения отображается отношением количества правильно классифицированных элементов тестовой выборки к количеству всех элементов этой выборки.

Результаты обучения CapsGNN

*CapsGNN training results*

Количество эпох <i>Number of epochs</i>	Размер выборки <i>Sample size</i>		Среднее количество <i>Average quantity</i>		Точность <i>Accuracy</i>
	обучающей <i>teaching</i>	тестовой <i>test</i>	вершин <i>peaks</i>	дуг <i>arcs</i>	
100	65	28	19	11	0,89
200	65	28	19	11	0,92
300	65	28	19	11	0,92

Рассматриваемую задачу можно обобщить до следующей формулировки: определить принадлежность sc-элемента одному из заданных множеств.

При реализации рассматриваемого уровня интеграции решатель задач автоматически выделит и решит следующие подзадачи:

- поиск класса метода решения поставленной задачи с помощью GNN;
- составление обучающей выборки в БЗ;

- выбор подходящей части семантической окрестности элементов;
- вычисление начальных эмбедингов элементов;
- обучение GNN классификации по заданным множествам;
- решение задачи с помощью новой ИНС.

Основным преимуществом интеграции ИНС на основании унификации интерфейсов разработки является возможность решать задачи с помощью методов, которые не были известны системе на момент формулировки задач. Система начинает обретать навыки для решения поставленной задачи, что является важным шагом на пути к созданию сильного ИИ.

**4. Уровень конвергенции.** Все предыдущие уровни интеграции все еще не решают проблему черного ящика, так как ИНС проектируются, обучаются и интерпретируются в сторонних по отношению к БЗ модулях или сервисах. В БЗ известно только то, какие входы были переданы в ИНС и какие выходы были получены. Однако процесс преобразования входов в выходы все еще остается недоступным для формального описания внутри БЗ и анализа этого процесса с помощью имеющихся у интеллектуальной системы методов.

Уровень конвергенции подразумевает не только описание интерфейсов, но и выполнение процессов проектирования, обучения и интерпретации ИНС в БЗ. Перенос всех этих процессов в БЗ позволяет:

- анализировать процесс преобразования входных данных в выходные в ходе интерпретации ИНС с помощью других интегрированных в БЗ методов решения задач;
- оказывать интеллектуальную поддержку разработчикам ИНС;
- обеспечивать платформенную независимость *ostis*-систем, использующих ИНС.

Для интерпретации любого метода решения задач в БЗ необходимо иметь достаточный уровень описания денотационной и операционной семантики языка представления этого метода.

На уровне конвергенции денотационная семантика языка представления ИНС уточняется такими понятиями онтологии ИНС, как *нейрон*\*, *распределительный слой*\*, *обработывающий слой*\*, *функция активации*\*, *весовой коэффициент* и т. д. Полный набор понятий дан в работе [22], продолжением которой является настоящая статья. На рис. 6 показан пример формализации в БЗ полносвязной двухслойной ИНС с двумя нейронами на входном слое и одним нейроном на обработывающем слое. Формализованную ИНС интерпретируют специализированные агенты для решения задач.

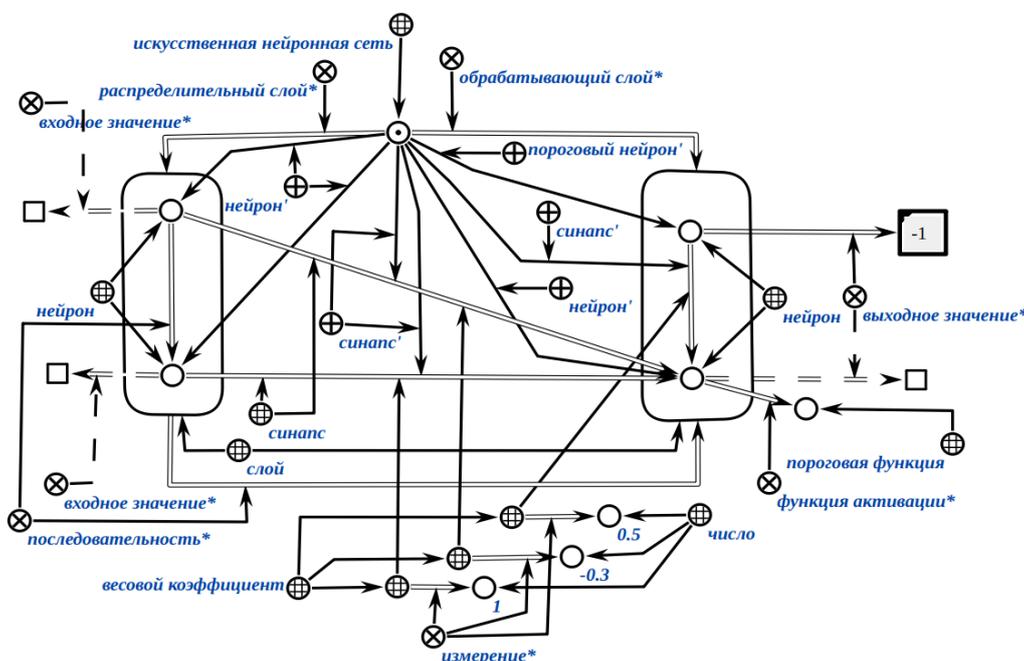


Рис. 6. Формализация в БЗ полносвязной двухслойной ИНС

Fig. 6. Formalization of the full-bonded two-layer ANN in the knowledge base

Операционная семантика языка представления ИНС задается в виде программы на некотором языке программирования, который может быть как внешним по отношению к *ostis*-системе, так и внутренним (на данный момент SCP). Каждому такому языку программирования (SCP, Python, C++ и т. д.) соответствует некоторая дочерняя предметная область Про ИНС. Следовательно, для интерпретации ИНС в БЗ операционная семантика языка представления ИНС уточняется Про ИНС на SCP.

SCP-программа – это последовательность обобщенных спецификаций (шаблонов) *scp*-операторов. Каждый *scp*-оператор является действием в памяти *ostis*-системы (*sc*-памяти). При интерпретации *scp*-программы абстрактный *sc*-агент создания *scp*-процессов порождает *scp*-процесс с учетом конкретных параметров интерпретации *scp*-программы, что на операционном уровне сводится к подстановке аргументов в обобщенные спецификации *scp*-операторов программы и генерации конкретных экземпляров этих программ (методов). Далее происходит добавление начального оператора в множество настоящих сущностей и начинается выполнение программы.

Таким образом, интерпретация *scp*-программы сводится к агентно-ориентированной обработке действий в *sc*-памяти, которыми являются *scp*-операторы. В случае интерпретации ИНС эти действия уточняют операционную семантику языка представления ИНС. Интерпретация ИНС декомпозируется на следующие действия:

- интерпретация слоя ИНС:
  - вычисление взвешенной суммы всех нейронов слоя;
  - вычисление функции активации всех нейронов слоя;
  - интерпретация сверточного слоя;
  - интерпретация пулинг-слоя;
- интерпретация нейрона ИНС.

Подробная спецификация перечисленных действий описана в работе [22]. Сами действия выполняются соответствующими им агентами, которые задают интерпретатор языка представления ИНС.

Наличие языка представления ИНС на SCP и его интерпретатора позволяет обеспечить интерпретацию ИНС в памяти *ostis*-системы. Наличие в БЗ не только экземпляров методов, но и понятий, описывающих их, создает основу для автоматизации процесса разработки ИНС. Для этого необходимо наличие среды разработки методов соответствующих классов. В случае ИНС речь идет об интеллектуальной среде разработки ИНС. Для такой среды выдвинуты следующие функциональные требования:

- генерация ИНС на основании спецификации задачи;
- автоматизация заданных пользователем этапов проектирования ИНС в соответствии с методикой;
- автоматизация процессов сравнения эффективности нейросетевых моделей;
- информационная поддержка пользователя на всех этапах проектирования ИНС;
- использование библиотеки обученных и предобученных ИНС.

В основе интеллектуальной среды разработки ИНС лежат соответствующие друг другу иерархии действий, задач и методов разработки ИНС. Построение иерархии соответствующих действий разработки ИНС сделано на основании этапов проектирования и обучения ИНС, которые в общем случае выполняют все разработчики ИНС. Данные этапы были описаны в работе [24]. На основании этих этапов выделена следующая иерархия действий по работе с ИНС:

- интерпретация ИНС;
- разработка ИНС:
  - проектирование ИНС:
    - выбор класса ИНС;
    - формирование спецификации входов и выходов ИНС;
  - обучение ИНС:
    - выбор метода оптимизации;
    - выбор минимизируемой функции ошибки;

- начальная инициализация ИНС;
- выбор гиперпараметров ИНС;
- обучение ИНС;
- оценка эффективности ИНС;
- обработка выборки:
  - поиск подходящей обучающей выборки;
  - формирование требований к обучающей выборке;
  - очистка выборки;
  - выявление содержательных признаков;
  - трансформация выборки;
  - разбиение выборки.

Все перечисленные действия специфицируются в рамках ПрО и онтологии ИНС, частными ПрО которой являются ПрО обучения и проектирования ИНС. Данные ПрО описаны в работе [22].

Под каждую интегрированную среду проектирования и обучения ИНС создается свой коллектив агентов, выполняющий перечисленные действия. Также возможна интеграция предобученных моделей, которые интегрированы по интерфейсу обучения. Все ПрО и агенты, обеспечивающие данный уровень интеграции, являются частью библиотеки многократно используемых компонентов.

**Заключение.** Выделенные уровни интеграции ИНС с БЗ позволяют систематизировать актуальные исследования в этой области интеграции. На основании анализа работ, соответствующих выделенным уровням, удалось сформулировать требования к моделям и средствам разработки ИНС и их интеграции с БЗ интеллектуальной системы, спецификация которых уточняется на каждом уровне интеграции.

Были описаны модель представления ИНС в БЗ; агентно-ориентированная модель разработки и интерпретации ИНС в БЗ, обеспечивающая интеграцию ИНС в БЗ на всех выделенных уровнях, а также метод классификации сущностей БЗ с помощью графовой нейронной сети.

Описанные модели и средства позволяют интегрировать в БЗ интеллектуальную систему любые обученные ИНС и использовать их для решения комплексных задач. Становятся возможными проектирование и обучение ИНС на основании как внешних данных, так и фрагментов БЗ, а также автоматизация процесса разработки ИНС в БЗ.

Продолжением настоящего исследования станет создание интеллектуальной среды разработки ИНС в БЗ и новых методов обработки фрагментов БЗ с помощью графовых нейронных сетей.

#### Список использованных источников

1. Attention Is All You Need [Electronic resource] / A. Vaswani [et al.]. – 2017. – Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>. – Date of access: 20.06.2023.
2. Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback [Electronic resource] / L. Ouyang [et al.]. – 2022. – Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.02155>. – Date of access: 20.06.2023.
3. Radford, A. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks [Electronic resource] / A. Radford, L. Metz, S. Chintala. – 2016. – Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.06434>. – Date of access: 20.06.2023.
4. Kejrival, M. Knowledge graphs: A practical review of the research landscape [Electronic resource] / M. Kejrival // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 13(4), no. 161. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/info13040161>. – Date of access: 20.06.2023.
5. Tsamoura, E. Neural-symbolic integration: a compositional perspective / E. Tsamoura, T. Hospedales, L. Michael // Proceedings of the AAI Conf. on Artificial Intelligence, held virtually, 2–9 Feb. 2021. – Vol. 35, no. 6. – P. 5051–5060. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i6.16639>
6. Deep Learning Meets Knowledge Graphs: A Comprehensive Survey [Electronic resource] / S. Yu [et al.]. – 2022. – Mode of access: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2021923/v1>. – Date of access: 20.06.2023.

7. Golenkov, V. Next-generation intelligent computer systems and technology of complex support of their life cycle / V. V. Golenkov, N. A. Gulyakina // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022) : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – Вып. 6. – P. 27–40.
8. Stokel-Walker, C. AI chatbots are coming to search engines – can you trust the results? [Electronic resource] / C. Stokel-Walker // Nature. – 2023. – Mode of access: <https://www.nature.com/articles/d41586-023-00423-4>. – Date of access: 20.06.2023.
9. Hoy, M. B. Alexa, Siri, Cortana, and More: An introduction to voice assistants / M. B. Hoy // Medical Reference Services Quarterly. – 2018. – Vol. 37, no. 1. – P. 81–88.
10. Wiley, V. Computer vision and image processing: A paper review / V. Wiley, T. Lucas // International J. of Artificial Intelligence Research. – 2018 – Vol. 2, no. 1. – P. 28–36. <https://doi.org/10.29099/ijair.v2i1.42>
11. A survey on state-of-the-art techniques for knowledge graphs construction and challenges ahead / A. Hur [et al.] // IEEE Fourth Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering (AIKE), Laguna Hills, 1–3 Dec. 2021. – Laguna Hills, 2021. – P. 99–103. <https://doi.org/10.1109/AIKE52691.2021.00021>
12. A neural-symbolic approach to computer vision / A. Kroschanka [et al.] // Communications in Computer and Information Science : Proceedings of the 11<sup>th</sup> Intern. Conf. "Open Semantic Technologies for Intelligent Systems" (OSTIS-2021), Minsk, 16–18 Sept. 2021. – Cham : Springer, 2022. – Vol. 1625. – P. 282–309. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7_15)
13. Интеграция искусственных нейронных сетей с базами знаний / В. А. Головко [и др.] // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, № 3(29). – С. 366–386. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-3-366-386>
14. Nielsen, F. Å. Inferring visual semantic similarity with deep learning and Wikidata: Introducing / F. Å. Nielsen L. K. Hansen // CEUR Workshop Proceedings : Proceedings of the First Workshop on "Deep Learning for Knowledge Graphs and Semantic Technologies" (DL4KGS) co-located with the 15<sup>th</sup> "Extended Semantic Web Conf." (ESWC 2018), Heraklion, 4 June 2018. – Heraklion, 2018. – Vol. 2106. – P. 56–61.
15. Modeling relational data with graph convolutional networks / M. Schlichtkrull [et al.] // Lecture Notes in Computer Science : Proceedings of the 15<sup>th</sup> Intern. Conf. "European Semantic Web Conf." (ESWC 2018), Heraklion, 3–7 June 2018. – Cham : Springer, 2018. – Vol. 10843. – P. 593–607. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93417-4\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93417-4_38)
16. Comet, M. Clustering knowledge graphs [Electronic resource] / M. Comet, L. Teresa // Seminar Paper. – 2018. – P. 1–12. – Mode of access: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12494.08008>. – Date of access: 20.06.2023.
17. Saranya, A. A systematic review of explainable artificial intelligence models and applications: Recent developments and future trends / A. Saranya, R. Subhashini // Decision Analytics J. – 2023. – Vol. 7. – P. 100–230. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100230>
18. Averkin, A. Explainable artificial intelligence: rules extraction from neural networks / A. Averkin, S. Yarushev // Proceedings of the 11<sup>th</sup> Intern. Conf. on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions and Artificial Intelligence (ICSCCW–2021), Antgalya, 26–27 Aug. 2021. – Antgalya, 2021. – Vol. 362. – P. 102–109. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92127-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92127-9_17)
19. Castelvechi, D. Can we open the black box of AI? / D. Castelvechi // Nature. – 2016. – Vol. 538, no. 7623. – P. 20–23.
20. Chomsky, N. The False Promise of ChatGPT / N. Chomsky, I. Roberts, J. Watumull. – Mode of access: <https://www.nytimes.com/2023/03/08/opinion/noam-chomsky-chatgpt-ai.html>. – Date of access: 20.06.2023.
21. Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения / под общ. ред. В. В. Голенкова. – Минск : Бестпринт, 2023. – Гл. 3.6. – 1064 с.
22. Kovalev, M. Convergence and integration of artificial neural networks with knowledge bases in next-generation intelligent computer systems / M. V. Kovalev, A. A. Kroschanka, V. A. Golovko // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022) : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – Вып. 6. – С. 173–186.
23. eXnet: an efficient approach for emotion recognition in the wild / M. N. Riaz [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20(4), no. 1087. – P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s20041087>
24. Integration of large language models with knowledge bases of intelligent systems / K. Bantsevich [et al.] // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022) : сб. науч. тр. / редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2023. – Вып. 7. – P. 213–218.
25. Xinyi, Z. Capsule graph neural network [Electronic resource] / Z. Xinyi, L. Chen // Intern. Conf. on Learning Representations. – 2019. – Mode of access: <https://openreview.net/forum?id=Byl8BnRcYm>. – Date of access: 20.06.2023.

## References

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., ..., Polosukhin I. *Attention Is All You Need*, 2017. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762> (accessed 17.06.2023).
2. Ouyang L., Wu J., Jiang X., Almeida D., Wainwright C. L., ..., Lowe R. J. *Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.02155> (accessed 17.06.2023).
3. Radford A., Metz L., Chintala S. *Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks*, 2016. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.06434> (accessed 17.06.2023).
4. Kejriwal M. Knowledge graphs: A practical review of the research landscape. *Applied Sciences*, 2022, vol. 13(4), no. 161. Available at: <https://doi.org/10.3390/info13040161> (accessed 17.06.2023).
5. Tsamoura E., Hospedales T., Michael L. Neural-symbolic integration: a compositional perspective. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, held virtually, 2–9 February 2021*. Vol. 35, no. 6, pp. 5051–5060. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i6.16639>
6. Yu S., Xu C., Bai X., Bai X., Kuncheerathodi R., ..., Xia F. *Deep Learning Meets Knowledge Graphs: A Comprehensive Survey*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2021923/v1> (accessed 17.06.2023).
7. Golenkov V. V., Gulyakina N. A. *Next-generation intelligent computer systems and technology of complex support of their life cycle*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovaniya intellektual'nyh system : sbornik nauchnyh trudov [Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2022) : Research Papers Collection]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2022, iss. 6, pp. 27–40.
8. Stokel-Walker C. AI chatbots are coming to search engines – can you trust the results? *Nature*, 2023. Available at: <https://www.nature.com/articles/d41586-023-00423-4> (accessed 17.06.2023).
9. Hoy M. B. Alexa, Siri, Cortana, and more: An introduction to voice assistants. *Medical Reference Services Quarterly*, 2018, vol. 37, no. 1, pp. 81–88.
10. Wiley V., Lucas T. Computer vision and image processing: A paper review. *International Journal of Artificial Intelligence Research*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 28–36. <https://doi.org/10.29099/ijair.v2i1.42>
11. Hur A., Janjua N., Ahmed M. A survey on state-of-the-art techniques for knowledge graphs construction and challenges ahead. *IEEE Fourth International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering (AIKE), Laguna Hills, 1–3 December 2021*. Laguna Hills, 2021, pp. 99–103. <https://doi.org/10.1109/AIKE52691.2021.00021>
12. Kroshchanka A., Golovko V., Mikhno E., Kovalev M., ..., Zagorskij A. A neural-symbolic approach to computer vision. *Communications in Computer and Information Science : Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference "Open Semantic Technologies for Intelligent Systems" (OSTIS-2021), Minsk, 16–18 September 2021*. Cham, Springer, 2022, vol. 1625, pp. 282–309. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15882-7_15)
13. Golovko V., Golenkov V., Ivashenko V., Taberko V., Ivaniuk D., ..., Kovalev M. *Integration of artificial neural networks with knowledge bases*. Ontologija proektirovaniya [Design Ontology], 2018, vol. 8, no. 3(29), pp. 366–386. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-3-366-386> (In Russ.).
14. Nielsen F. Å., Hansen, L. K. Inferring visual semantic similarity with deep learning and Wikidata: Introducing. *CEUR Workshop Proceedings : Proceedings of the First Workshop on "Deep Learning for Knowledge Graphs and Semantic Technologies" (DLAKGS) co-located with the 15th "Extended Semantic Web Conference" (ESWC 2018), Heraklion, 4 June 2018*. Heraklion, 2018, vol. 2106, pp. 56–61.
15. Schlichtkrull M., Kipf T. N., Bloem P., van den Berg R., Titov I., Welling M. Modeling relational data with graph convolutional networks. *Lecture Notes in Computer Science : Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference "European Semantic Web Conference" (ESWC 2018), Heraklion, 3–7 June 2018*. Cham, Springer, 2018, vol. 10843, pp. 593–607. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93417-4\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93417-4_38)
16. Molinas C., Teresa L. Clustering knowledge graphs. *Seminar Paper*, 2018, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12494.08008> (accessed 17.06.2023).
17. Saranya A., Subhashini R. A systematic review of explainable artificial intelligence models and applications: Recent developments and future trends. *Decision Analytics Journal*, 2023, vol. 7, pp. 100–230. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100230>
18. Averkin A., Yarushev S. Explainable artificial intelligence: rules extraction from neural networks. *Proceedings of the 11th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions and Artificial Intelligence (ICSCCW-2021), Antgalya, 26–27 August 2021*. Antgalya, 2021, vol. 362, pp. 102–109. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92127-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92127-9_17)
19. Castelvocchi D. Can we open the black box of AI? *Nature*, 2016, vol. 538, no. 7623, pp. 20–23.

20. Chomsky N., Roberts I., Watumull J. *The False Promise of ChatGPT*. Available at: <https://www.nytimes.com/2023/03/08/opinion/noam-chomsky-chatgpt-ai.html> (accessed 17.06.2023).

21. Tehnologija kompleksnoj podderzhki zhiznennogo cikla semanticheski sovместimyh intellektual'nyh komp'yuternyh sistem novogo pokolenija. *Technology for Comprehensive Life Cycle Support of Semantically Compatible, Next-generation Intelligent Computer Systems*. In V. V. Golenkov (ed.). Minsk, Bestprint, 2023, chap. 3.6, 1064 p. (In Russ.).

22. Kovalev M., Kroschchanka A., Golovko V. *Convergence and integration of artificial neural networks with knowledge bases in next-generation intelligent computer systems*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovaniya intellektual'nyh system : sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2022) : Research Papers Collection*]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2022, iss. 6, pp. 173–186.

23. Riaz M., Shen Y., Sohail M., Guo M. eXnet: an efficient approach for emotion recognition in the wild. *Sensors*, 2020, Vol. 20(4), no. 1087, pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s20041087>

24. Bantsevich K., Kovalev M., Tsishchanka V., Malinovskaya N., Andrushevich A. *Integration of large language models with knowledge bases of intelligent systems*. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovaniya intellektual'nyh system : sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems (OSTIS-2023) : Research Papers Collection*]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2023, iss. 7, pp. 213–218.

25. Xinyi Z., Chen L. Capsule graph neural network. *International Conference on Learning Representations*, 2019. Available at: <https://openreview.net/forum?id=Byl8BnRcYm> (accessed 17.06.2023).

### Информация об авторе

*Ковалёв Михаил Владимирович*, исследователь технических наук, кафедра интеллектуальных информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.  
E-mail: kovalev@bsuir.by  
<https://orcid.org/0000-0002-9606-9541>

### Information about the author

*Mikhail V. Kovalev*, Researcher of Technical Sciences, the Department of Intelligent Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.  
E-mail: kovalev@bsuir.by  
<https://orcid.org/0000-0002-9606-9541>



УДК 615.47:616-072.8  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-106-114>

Оригинальная статья  
Original Paper

## Распознавание признаков болезни Паркинсона на основе анализа голосовых маркеров и двигательной активности

В. А. Вишняков<sup>✉</sup>, Ся Ивэй

Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь  
<sup>✉</sup>E-mail: vish@bsuir.by

### Аннотация

**Цели.** Решается задача ИТ-диагностики признаков болезни Паркинсона по анализу изменения голоса и замедления движения пациентов. Актуальность задачи связана с необходимостью ранней диагностики заболевания. Предлагается метод комплексного распознавания болезни Паркинсона с использованием машинного обучения, основанный на анализе голосовых маркеров и изменений в движениях пациентов на известных наборах данных.

**Методы.** Используются частотно-временная функция (функция вейвлета), функция кепстрального коэффициента Мейера, алгоритм  $k$ -ближайших соседей ( $k$ -Nearest Neighbors, KNN), алгоритм двухслойной нейронной сети для обучения и тестирования на общедоступных наборах данных по изменению речи и замедлению движения при болезни Паркинсона, а также байесовский оптимизатор для улучшения гиперпараметров алгоритма KNN.

**Результаты.** Алгоритм KNN использован для распознавания речи пациентов, точность теста 94,7 % достигнута при диагностике болезни Паркинсона по изменению голоса. Алгоритм байесовской нейронной сети применен для распознавания замедления движения пациентов, он дал точность теста 96,2 %.

**Заключение.** Полученные результаты распознавания признаков болезни Паркинсона близки к мировому уровню. На том же наборе данных по изменению речи пациентов один из лучших показателей зарубежных исследований составляет 95,8 %, а на наборе данных по замедлению движения пациентов – 98,8 %. Предлагаемая авторская методика предназначена для использования в подсистеме ИТ-диагностики неврологических заболеваний умного города.

**Ключевые слова:** распознавание болезни Паркинсона, машинное обучение, алгоритм KNN, голосовые маркеры, байесовская нейронная сеть, замедление движения, гиперпараметры

**Для цитирования.** Вишняков, В. А. Распознавание признаков болезни Паркинсона на основе анализа голосовых маркеров и двигательной активности // В. А. Вишняков, Ся Ивэй // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 106–114. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-106-114>

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 12.04.2023

Подписана в печать | Accepted 16.05.2023

Опубликована | Published 29.09.2023

## Recognition of signs of Parkinson's disease based on the analysis of voice markers and motor activity

Uladzimir A. Vishniakou<sup>✉</sup>, Xia Yiwei

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
st. P. Brovka, 6, Minsk, 220013, Belarus

<sup>✉</sup>E-mail: vish@bsuir.by

### Abstract

**Objectives.** The problem of IT diagnostics of signs of Parkinson's disease is solved by analyzing changes in the voice and slowing down the movement of patients. The urgency of the task is associated with the need for early diagnosis of the disease. A method of complex recognition of Parkinson's disease using machine learning is proposed, based on markers of voice analysis and changes in the patient's movements on known data sets.

**Methods.** The time-frequency function (the wavelet function) and the Meyer kepsstral coefficient function, the KNN algorithm (*k*-Nearest Neighbors, KNN) and the algorithm of a two-layer neural network are used for training and testing on publicly available datasets on speech changes and motion retardation in Parkinson's disease. A Bayesian optimizer is also used to improve the hyperparameters of the KNN algorithm.

**Results.** The KNN algorithm was used for speech recognition of patients, the test accuracy of 94.7% was achieved in the diagnosis of Parkinson's disease by voice change. The Bayesian neural network algorithm was applied to recognize the slowing down of the patients' movements, it gave a test accuracy of 96.2% for the diagnosis of Parkinson's disease.

**Conclusion.** The obtained results of recognition of signs of Parkinson's disease are close to the world level. On the same set of data on speech changes of patients, one of the best indicators of foreign studies is 95.8%. On the same set of data on motion deceleration, one of the best indicators of foreign researchers is 98.8%. The proposed author's technique is intended for use in the subsystem of IT diagnostics of neurological diseases of a Smart city.

**Keywords:** Parkinson's disease recognition, machine learning, KNN algorithm, voice markers, Bayesian neural network, motion deceleration, hyperparameters

**For citation.** Vishniakou U. A., Xia Yiwei. *Recognition of signs of Parkinson's disease based on the analysis of voice markers and motor activity*. Informatika [Informatics], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 106–114 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-106-114>

**Conflict of interest.** The authors declare of no conflict of interest.

**Введение.** Болезнь Паркинсона (БП) – распространенное нейродегенеративное заболевание пожилых людей. Средний возраст заболевших составляет 60 лет, и число пораженных постепенно с возрастом увеличивается. Медицинские исследования показывают, что патология БП имеет два основных аспекта [1]: депигментацию черной субстанции вследствие дегенерации нейронов, содержащих меланин и дофамин, и образование тел Леви в черной субстанции и других областях мозга, таких как прилежащее ядро и части коры.

В работе [2] были выделены шесть стадий заболевания при условии, что нарушения обоняния и речи возникают на первых двух стадиях. Согласно исследованию 89 % пациентов с БП имеют различные степени нарушения речи, основными симптомами которых являются низкая громкость, невнятность, хрипота, монотонность, отсутствие эмоциональных изменений и замедленность речи. Третья и четвертая стадии отличаются более выраженными симптомами, наиболее значимые из них – тремор в состоянии покоя, замедление движения, а на поздних стадиях заболевания – нарушение равновесия. На заключительных стадиях (пятой и шестой) проявляются все клинические симптомы. Таким образом, изучение нарушений речи и движений как симптомов у пациентов с БП выступает исходной задачей для ранней диагностики заболевания, в том числе с использованием ИТ.

**Методы исследования.** ИТ-исследование выполнено с целью классификации больных паркинсонизмом и здоровых людей с выделением 14 особенностей фонации и 12 кепстральных особенностей речи. Проанализированные 14 признаков фонации включают пять вариантов

дрожания, шесть вариантов мерцания, два признака гармоничности и среднюю автокорреляцию основного частотного признака [3].

В работе [4] был использован метод, основанный на распознавании и классификации с применением глубокой нейронной сети (Deep Neural Network, DNN) в сочетании с мини-пакетным градиентным спуском (МППС) для отличия пациентов с БП от здоровых людей по признакам изменения голоса. Авторы применили метод взвешенных кепстральных коэффициентов Мейера WMFCC для извлечения объектов. Метод WMFCC может решить проблему, заключающуюся в том, что кепстральные коэффициенты Мейера высокого порядка малы, а способность компонента функции Features к представлению звука слаба. МППС снижает вычислительную нагрузку на функцию потерь и увеличивает скорость обучения системы.

Подход к анализу движения людей в работе [5] основан на квартильном отклонении нормального распределения для выбора наилучших признаков. В 2019 г. в работе [6] была предложена интеллектуальная система обнаружения БП, основанная на методах глубокого обучения для анализа информации о походке человека. Авторы использовали сверточную нейронную сеть 1D-Convnet для построения классификатора на основе DNN.

В работе [7] авторы проанализировали технику распознавания изменения речи людей, используя x-векторы, и осуществили автоматическое обнаружение признаков БП. Растущая популярность и успех сетей Transformer при обработке естественного языка и распознавании изображений побудили разработать новый метод решения проблемы, основанный на автоматическом извлечении признаков БП с помощью таких сетей. Использование их в 1D-сигнале еще не получило широкого распространения, но в работе [8] показано, что они эффективны при извлечении релевантных признаков из 1D-сигналов.

**Алгоритмы распознавания БП.** Рассмотрим использование машинного обучения и нейронных сетей в качестве методов выявления признаков БП. В зависимости от применяемых входных данных, метода обучения и выходных данных изученной модели алгоритмы машинного обучения и алгоритмы нейронных сетей можно разделить на следующие четыре категории:

1. *Контролируемое обучение.* Строится отображение от входных данных к выходным на основе наблюдений за серией выборок, каждая из которых имеет соответствующий выходной сигнал, и в конечном итоге создается прогностическая модель.

2. *Обучение без присмотра.* Требуется только серия точек выборки в качестве входных данных. Нет необходимости, чтобы выборки были предварительно помечены соответствующими выходными данными. Информация, полученная с помощью алгоритма, может быть применена для построения описательной модели, классическим примером которой является поисковая система.

3. *Обучение с полуконтролем.* Используются в большом количестве немаркированные данные, а также одновременно помеченные данные для выполнения работы по распознаванию образов.

4. *Обучение с подкреплением.* Выполняется путем повторения (несколько раз) и наблюдения за обратной связью, генерируемой средой после каждой итерации. Фактически выходные данные и действия, предпринимаемые моделью после каждой итерации, будут оказывать влияние на окружающую среду и окружающая среда будет обеспечивать обратную связь в ответ на эти воздействия. В основном используется для распознавания речи и текста.

Параметры служат ключом к алгоритмам машинного обучения и обычно делятся на общие и гиперпараметры. *Общие параметры* – это переменные, которые могут быть автоматически извлечены моделью из данных, например веса каждого слоя нейронной сети, априорная вероятность каждого класса в простом байесовском алгоритме и др. *Гиперпараметры* представляют собой внешние по отношению к модели конфигурации, значения которых не могут быть оценены по данным и обычно задаются вручную (как правило, являются эмпирически определенными переменными). Различные методы машинного обучения имеют разные гиперпараметры. В частности, в нейронных сетях гиперпараметрами служат скорость обучения, параметр регуляризации, количество слоев, эпоха, функция потерь, метод инициализации весов, функция активации нейронов и др.

Поскольку входные данные являются помеченными, разработки, приведенные в настоящей статье, относятся к контролируемому обучению. Использован алгоритм KNN для машинного

обучения сети распознавания БП по голосу и байесовский алгоритм нейронной сети распознавания БП по изменению движения.

**Алгоритм KNN.** Основная идея алгоритма  $k$ -ближайших соседей ( $k$ -Nearest Neighbors, KNN) заключается в том, что если большинство из  $k$  ближайших выборок в пространстве объектов принадлежат к определенной категории, то выборка также принадлежит к этой категории [9]. Алгоритм KNN имеет два основных параметра:

1. Расстояние. Распространенными методами вычисления расстояний между двумя точками являются манхэттенское расстояние, евклидово расстояние и расстояние Минковского. К расстоянию до каждой точки можно добавить вес, чтобы более близкая точка получила больший вес. К вычисленному значению добавляется значение функции, например обратной функции, функции Гаусса и т. д.

2. Значение  $k$ . Оно является целым числом, не превышающим 20. Значение  $k$  слишком мало, чтобы на него влияли выбросы, и слишком велико, чтобы на него влиял дисбаланс выборки.

Входные данные:  $k$  – количество ближайших соседей, набор тестовой выборки, набор обучающей выборки. В результате получаем набор этикеток тестового образца.

Реализация алгоритма KNN:

*Шаг 1.* Ввод данных обучения и тестирования.

*Шаг 2.* Определение параметра  $k$ .

*Шаг 3.* Вычисление расстояния до объекта по заданным обучающим данным: между точкой в наборе данных известной категории и текущей точкой; между точкой данных, класс которой должен быть предсказан, и всеми точками обучающих данных. Можно использовать евклидово расстояние.

*Шаг 4.* Сортировка результатов в порядке возрастания (последовательно от низкого к высокому).

*Шаг 5.* Выбор  $k$  точек с наименьшим расстоянием от текущей точки (классификация ближайших соседей на основе значения  $k$ ).

*Шаг 6.* Определение частоты встречаемости категории, в которой расположены  $k$  точек.

*Шаг 7.* Возврат к категории с наибольшей частотой появления первых  $k$  точек в качестве прогнозируемой классификации текущей точки. При использовании категории ближайшего соседа как наиболее доминирующей она прогнозируется как метка объекта. Нахождение количества классов от ближайшего соседа и установка класса данных, подлежащих оценке.

Алгоритм KNN прост в вычислительном отношении, но требует больших вычислительных затрат и большого объема памяти, поэтому для него необходимо выбрать подходящее значение  $k$ .

**Алгоритм байесовской нейронной сети.** Байесовские нейронные сети (Bayesian Neural Networks, BNN) сочетают вероятностное моделирование с нейронными сетями и способны повысить прогнозируемый результат. Входной слой нейронной сети используется для описания ключевых параметров и ввода данных, выходной слой – для описания вероятности или распределения вероятностей. Апостериорное распределение вычисляется путем выборки или вариационного вывода. BNN отличаются от обычных нейронных сетей тем, что весовые параметры в них являются случайными величинами. В работе [10] BNN использовалась для распознавания БП по замедлению движения.

Гиперпараметры в BNN включают:

- количество скрытых слоев;
- параметры регуляризации. Коэффициенты регуляризации влияют на способность модели к обобщению;
- количество нейронов на слой;
- эпоху обучения;
- скорость обучения, график скорости обучения для обновления веса;
- функцию активации скрытого слоя (логистической регрессии,  $\tanh$ ,  $\text{relu}$  и т. д.);
- размер мини-пакета для небольших пакетов данных, количество образцов за тренировочную сессию;

– решатель для оптимизации веса (lbfgs – оптимизатор в семействе квазиньютоновских методов, sgd – стохастический градиентный спуск, adam – оптимизатор на основе стохастического градиента).

**Распознавание признаков заболевания.** В 2019 г. в работе [10] были изучены речевые расстройства при БП и к собранным данным<sup>1</sup> применены различные алгоритмы обработки речевых сигналов, учитывающие особенности временной частоты, характеристики кепстрального коэффициента Мейера и др. Данные, использованные в этом исследовании (звук), были собраны у 188 пациентов с БП (107 мужчин и 81 женщины) в возрасте от 33 до 87 лет ( $65,1 \pm 10,9$ ) в отделении неврологии медицинского факультета Серрахпа Стамбульского университета. Контрольную группу составили 64 здоровых человека (23 мужчины и 41 женщина) в возрасте от 41 до 82 лет ( $61,1 \pm 8,9$ ). В процессе сбора данных микрофон настраивался на частоту 44,1 кГц, и после осмотра врачом у каждого испытуемого с тремя повторениями была получена устойчивая фонетика гласной *a*.

Проблема замедления движения при БП была исследована в работе [11]. Набор данных Daphnet (движение) был сформирован в лаборатории с акцентом на генерацию множества событий замедления<sup>2</sup>. Пользователи выполняли три вида задач: ходьбу по прямой, ходьбу с многочисленными поворотами и, наконец, реальную повседневную задачу, когда пользователи заходили в разные комнаты, принося кофе, открывая двери и т. д. Набор данных получен с трех носимых беспроводных датчиков ускорения, регистрирующих 3D-ускорение с частотой 64 Гц. Датчики располагались на голени, бедре и тазобедренном суставе испытуемого. Для распознавания БП по движению была разработана модель нейронной сети, которая использует двухслойную полностью связанную сеть с первым и вторым слоями (10 нейронов), а также функцию ReLU для активации нейронов. Функция ReLU лучше сигмоидальных функций и функций гиперболического тангенса, поскольку легче находит производные, а также увеличивает нелинейность сети.

В настоящей статье вышеупомянутые общедоступные наборы данных (звук, движение) были выбраны в качестве экспериментальных. После очистки и предварительной обработки данных были извлечены характеристики частотно-временной области, обратные спектральные коэффициенты Мейера и вейвлет-коэффициенты в наборах данных «звук». В наборах данных «движение» были извлечены пять частотно-временных характеристик: энтропия вейвлета, энергия вейвлета, длина формы вейвлет-сигнала, дисперсия вейвлет-коэффициента и стандартное отклонение вейвлет-коэффициента. Затем набор признаков данных был нормализован и разделен на набор обучающих данных и набор тестовых данных в соотношении 9:1. Обучающие наборы данных обрабатывались и тестировались с помощью пятикратной перекрестной проверки с пятикратным повторением. Набор тестовых данных использовался для проверки окончательных результатов.

**Результаты экспериментов.** Перед началом экспериментов были введены параметры модели оценки. Показатели эффективности для конкретного класса  $k$  включали чувствительность ( $Sens_k$ ), точность ( $Prec_k$ ) и  $F1$ -оценку ( $F1_k$ ):

$$Sens_k = \frac{C_{k,k}}{\sum_{i=1}^K C_{i,k}},$$

$$Prec_k = \frac{C_{k,k}}{\sum_{j=1}^K C_{k,j}},$$

$$F1_k = 2 \cdot \frac{Prec_k \cdot Sens_k}{Prec_k + Sens_k},$$

где  $i$  – количество строк матрицы путаницы,  $j$  – количество столбцов матрицы путаницы,  $k$  – номер любого класса,  $C$  – единственный элемент в матрице путаницы.

<sup>1</sup>Parkinson Data Set [Electronic resource]. – Mode of access: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/parkinsons>. – Date of access: 12.03.2023.

<sup>2</sup>Daphnet Freezing of Gait Data Set [Electronic resource]. – Mode of access: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Daphnet%2BFreezing%2Bof%2BGait>. – Date of access: 12.03.2023.

Поскольку объем данных в наборе данных «звук» невелик, был использован алгоритм KNN, который представляет собой простой алгоритм классификации машинного обучения. Также был применен байесовский оптимизатор для улучшения гиперпараметров KNN. Количество итераций вычисления составило 30. На графике (рис. 1) видно, что минимальный индекс ошибки классификации стремится к стабильному состоянию, когда количество итераций 15, и достигает минимального значения на 29-й итерации. Поэтому для эксперимента значение параметра KNN 29-й итерации берется в качестве предпоследнего.

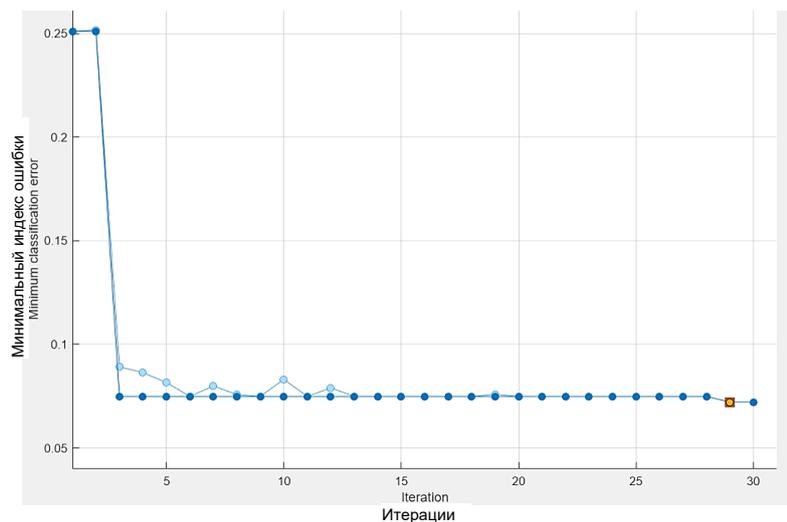


Рис. 1. График минимальной ошибки классификации по речевым признакам для алгоритма KNN  
Fig. 1. Graph of the minimum classification error by speech features for the KNN algorithm

При проведении эксперимента был использован метод PCA (метод главных компонент), чтобы выбрать десять функций, которые больше всего соответствуют модели. Численными параметрами алгоритма KNN являлись: количество соседей, мера расстояния (функция косинуса), вес расстояния (алгоритм обратного взвешивания расстояния). Матрица путаницы и график ROC(Receiver Operating Characteristics)-кривой [12] результатов тестового эксперимента по распознаванию БП после обучения модели представлены на рис. 2.

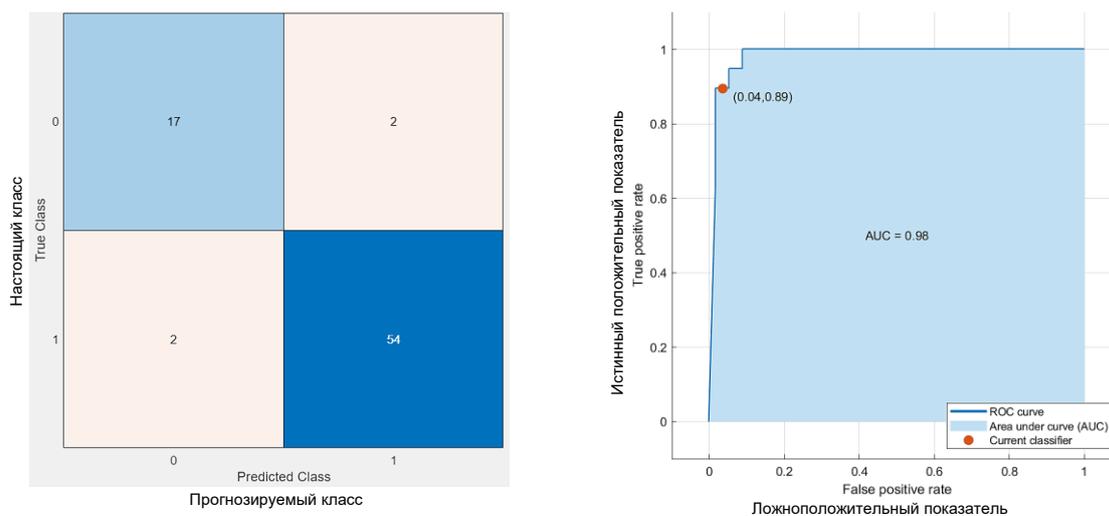


Рис. 2. Матрица путаницы и ROC-графики тестового набора данных «звук»  
Fig. 2. Confusion matrix and ROC plots of test dataset "sound"

Матрица путаницы и график ROC-кривой результатов тестового эксперимента для набора данных по изменению движения показаны на рис. 3.

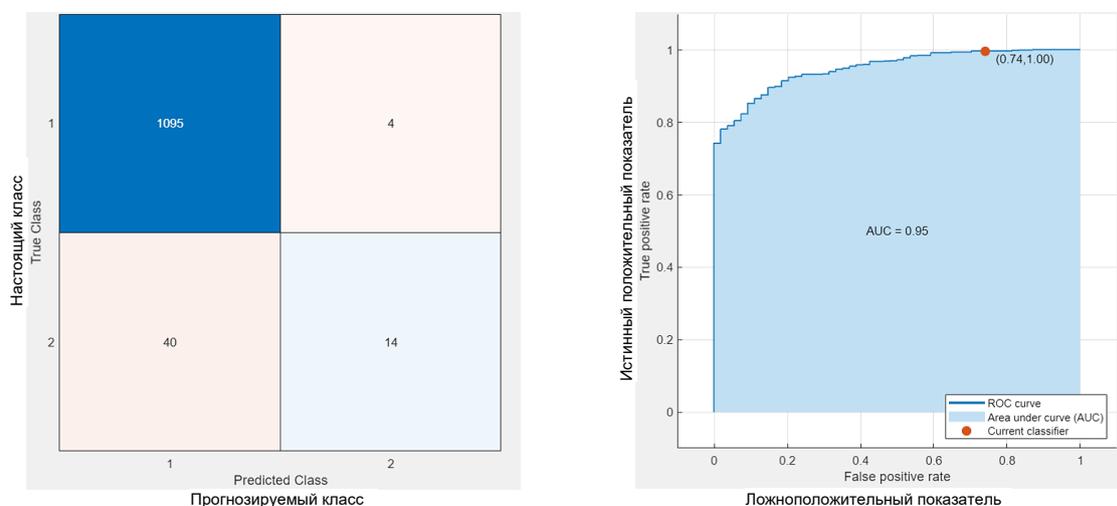


Рис. 3. Матрица путаницы и ROC-графики тестового набора данных «движение»

Fig. 3. Confusion matrix and ROC plots of test dataset "action"

Данные тестовых экспериментов при распознавании БП по изменению речи и изменению движения приведены в таблице.

Показатели распознавания БП по набору данных «звук» и «движение»

*Parkinson's disease recognition scores on the "sound" and "action" dataset*

Набор данных <i>Data set</i>	Показатель, % <i>Indicator, %</i>			
	Средняя точность <i>Average accuracy</i>	Средняя чувствительность <i>Medium sensitivity</i>	Средняя F1-оценка <i>Average F1 score</i>	Точность тестирования <i>Testing accuracy</i>
Звук	92,95	92,95	92,95	94,7
Движение	62,78	87,13	72,98	96,2

Модель может достичь точности 94,7 % при диагностировании БП на основе речевых данных и высокого показателя F1-оценки (до 92,95 %). Точность набора обучающих данных составила 92,8 %, а точность набора тестовых данных – 94,7 %. Точность тестового набора на 1,9 % выше, чем точность обучающего набора. Следовательно, объем экспериментальных данных слишком мал, что приведет к неравномерному срезу набора данных, если модель правильно отражает структуру распределения внутри данных. Возможно, что внутренняя дисперсия обучающего набора будет больше, чем набора проверки. Это приведет к большей ошибке в обучающем наборе и потребует перераспределения набора данных, чтобы сделать его более равномерным. На том же наборе данных<sup>3</sup> один из лучших показателей зарубежных исследований составляет 95,8 % [13].

В ходе экспериментов выяснилось также, что точность распознавания при использовании двухслойной нейронной сети для набора данных по изменению движения пациентов достигает 96,2 %. На том же наборе данных Daphnet один из лучших показателей зарубежных исследований составляет 98,8 % [12]. Однако матрица путаницы показывает, что средневзвешенный балл F1 тестового набора данных низок, всего 72,98 %, из-за несбалансированности набора данных. Данные о движении в наборе данных содержат сведения о различных его формах. Эти данные смешанные, что приводит к снижению точности распознавания БП.

<sup>3</sup>URL: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/parkinsons>

**Заключение.** Частотно-временные (вейвлет-) характеристики в исследованиях включали энтропию энергии вейвлета, энергию вейвлета, дисперсию коэффициента вейвлета, малую длину волны и коэффициент вейвлета. Методом извлечения признаков PCA было получено десять вейвлет-признаков. Алгоритм KNN применялся при распознавании речи пациентов, точность теста 94,7 % была достигнута при диагностике БП по изменению голоса. Алгоритм байесовской нейронной сети был использован для распознавания замедления движений пациентов, при диагностике БП он дал точность теста 96,2 %.

Результаты экспериментов показывают, что раннее выявление БП на основании данных об изменении голоса и движения является довольно эффективным. Видно также, что большое влияние на результаты экспериментов оказывает набор данных. Более сбалансированный набор данных с большим объемом может обеспечить лучшие результаты распознавания.

ИТ-технология для распознавания БП имеет прикладной характер и высокую исследовательскую значимость. Дальнейшая работа в этом направлении может заключаться в анализе частотно-временных характеристик и исследовании влияния количества различных вейвлетов, уровней разложения вейвлетов и их статистических характеристик на точность распознавания. Частота дискретизации набора данных также может быть увеличена. Увеличение частоты дискретизации позволит собирать более полную информацию для получения лучших вейвлет-характеристик. Кроме того, эксперимент с большим набором данных и сбалансированными категориями данных о БП даст более объективные и точные результаты.

**Вклад авторов.** В. А. Вишняков предложил концепцию, методы исследования, утвердил окончательный вариант статьи для публикации. Ся Ивэй реализовал алгоритмы и провел экспериментальные исследования.

## References

1. Davie C. A. A review of Parkinson's disease. *British Medical Bulletin*, Feb. 2008, vol. 86, no. 1, pp. 109–127. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldn013>
2. Braak H., Ghebremedhin E., Rüb U., Bratzke H., Tredici K. D. Stages in the development of Parkinson's disease-related pathology. *Cell and Tissue Research*, October 2004, vol. 318, no. 1, pp. 121–134. <https://doi.org/10.1007/s00441-004-0956-9>
3. Upadhyaya S. S., Cheeran A. N. Discriminating Parkinson and healthy people using phonation and cepstral features of speech. *Procedia Computer Science*, January 2018, vol. 143, pp. 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.376>
4. Voiceprint recognition of Parkinson Patients Based on Deep Learning [Electronic resource] / Z. Xu [et al.]. – Dec. 2018. – P. 1–10. – Mode of access: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.06613.pdf>. – Date of access: 12.11.2022.
5. Transformers for 1D Signals in Parkinson's Disease Detection from Gait [Electronic resource] / D. M. D. Nguyen [et al.]. – Apr. 2022. – P. 1–7. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/2204.00423.pdf>. – Date of access: 12.11.2022.
6. Arshad H., Khan M. A., Sharif M., Yasmin M., Javed M. Y. Multi-level features fusion and selection for human gait recognition: an optimized framework of Bayesian model and binomial distribution. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, December 2018, vol. 10, no. 12, pp. 3601–3618. <https://doi.org/10.1007/s13042-019-00947-0>
7. Maachi I. E., Bilodeau G.-A., Bouachir W. Deep 1D-Convnet for accurate Parkinson disease detection and severity prediction from gait. *Expert Systems with Applications*, May 2020, vol. 143, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113075>
8. Moro-Velazquez L., Gomez-Garcia J. A., Arias-Londoño J. D., Dehak N., Godino-Llorente J. I. Advances in Parkinson's Disease detection and assessment using voice and speech: A review of the articulatory and phonatory aspects. *Biomedical Signal Processing and Control*, April 2021, vol. 66, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102418>
9. Zhang M.-L., Zhou Z.-H. ML-KNN: A lazy learning approach to multi-label learning. *Pattern Recognition*, 2007, vol. 40, no. 7, pp. 1–21.

10. Sakar C. O., Serbes G., Gunduz A., Tunc H. C., Nizam H., ..., Apaydin H. A comparative analysis of speech signal processing algorithms for Parkinson's disease classification and the use of the tunable Q-factor wavelet transform. *Applied Soft Computing*, January 2019, vol. 74, pp. 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.10.022>
11. Sakar B. E., Isenkul M. E., Sakar C. O., A. Sertbas, Gurgun F., ..., Kursun O. Collection and analysis of a Parkinson speech dataset with multiple types of sound recordings. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2013, vol. 17(4), pp. 828–834.
12. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2006, vol. 27, no. 8, pp. 861–874.
13. Li B., Yao Z., Wang J., Wang S., Yang X., Sun Y. Improved deep learning technique to detect freezing of gait in Parkinson's disease based on wearable sensors. *Electronics*, 2020, no. 9(11), pp. 1–12.

### Информация об авторах

*Вишняков Владимир Анатольевич*, доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

*Ся Ивэй*, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

*Uladzimir A. Vishniakou*, D. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

*Xia Yiwei*, Postgraduate Student of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

## Правила для авторов

Редакция журнала «Информатика» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи принимаются в редакцию через электронную систему подачи по адресу <http://inf.grid.by> в формате файлов текстовых редакторов Microsoft Word. Объем оригинальной статьи – от 8 до 16 стр., включая рисунки, таблицы и достаточное количество наиболее актуальных ссылок; объем обзорной статьи – от 16 до 32 стр., включая все основные ссылки. Текст набирается с переносами, шрифт Times New Roman 11 пт, интервал между строками – одинарный, абзацный отступ 0,5 см, поля по 2,5 см со всех сторон.

Материал статьи должен быть четко структурированным: Введение; основные разделы, в которых изложены цели и задачи, методы, результаты; Заключение (выводы).

II. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на публикацию (сопроводительное письмо за подписью руководителя или выписку из заседания ученого совета, отдела или кафедры, акт экспертизы).

III. Статьи в обязательном порядке должны включать аннотацию, ключевые слова, список литературы, информацию об авторах на русском и английском языках.

На титульной странице располагаются следующие метаданные:

1. Индекс по универсальной десятичной классификации (УДК); на русском и английском языках тип статьи (оригинальная или обзорная), название статьи, инициалы и фамилии всех авторов, полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием почтового адреса, при наличии указывается ученая степень и ORCID, e-mail ответственного лица.

2. Аннотация (Abstract) объемом 150–250 слов в оригинальной статье должна быть структурирована отдельными подразделами: Цели, Методы, Результаты, Заключение, а также максимально характеризовать содержательную часть рукописи. Сюда не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

3. Ключевые слова (Keywords) – наиболее значимые слова или словосочетания по теме работы, отражающие специфику темы, объекты и результаты исследования; перечень ключевых слов должен содержать 5–10 слов.

4. В разделе Благодарности (Acknowledgements) указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей.

5. Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию в раздел Конфликт интересов (Conflict of interest).

6. Формулы, рисунки, таблицы в статье нумеруются в соответствии с порядком их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки и таблицы в тексте обязательны. Рисунки должны быть выполнены с хорошим разрешением в масштабе, позволяющем четко различать надписи и обозначения. Цветные иллюстрации печатаются только в том случае, когда это необходимо для понимания излагаемого материала. Подрисуночные подписи с расшифровкой всех позиций, представленных на рисунке, и названия таблиц набираются шрифтом гарнитуры основного текста размером 9 пт. Перевод подрисуночной подписи и пояснений к рисунку, а также перевод названия таблицы, заголовки строк или столбцов располагаются курсивом после русскоязычной версии.

7. Набор формул выполняется в формульном редакторе Microsoft Equation или Math Type. Прямым шрифтом набираются: греческие и русские буквы; математические символы ( $\sin$ ,  $\lg$ ,  $\infty$ ); символы химических элементов (C, Cl, CH<sub>3</sub>); цифры (римские и арабские); индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращениями слов. Курсивом набираются латинские буквы, символы физических величин (в том числе и в индексе).

8. Список использованной литературы оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.5–2008). Номер литературной ссылки в тексте дается порядковым номером в квадратных скобках. Ссылаться на неопубликованные работы не допускается.

10. Отдельно оформляется References со следующей структурой: авторы (транслитерация), транслитерированное название монографии, *Перевод названия монографии на английский язык*. Выходные данные с обозначениями на английском языке. От транслитераций названий статей можно отказаться.

Ссылки на учебно-методическую литературу, ГОСТы, авторефераты, статистические отчеты в список не включаются, а оформляются в виде сносок (с подробными рекомендациями можно ознакомиться на сайте журнала в разделе Правила для авторов).

11. В разделе Информация об авторах (Information about the authors) приводятся ФИО авторов полностью, ученая степень, звание, должность, название организации, ORCID (при наличии).

IV. Все поступающие в редакцию рукописи проходят предварительную проверку на соответствие Правилам для авторов. Статья может быть возвращена автору на доработку с просьбой устранить недостатки или дополнить информацию. После проверки на соответствие правилам статья направляется рецензенту с указанием сроков рецензирования.

V. При наличии замечаний рецензента автору предоставляется определенное время на доработку рукописи. Статьи, направляемые на доработку, должны быть возвращены в исправленном виде с ответами на все замечания. Окончательное решение о публикации или отклонении рукописи принимается редколлегией журнала. При положительном заключении рецензента статья передается редактору для подготовки к печати. Редакция оставляет за собой право на редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

VI. Редакция журнала предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, которые осуществляют послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

VII. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, уже опубликованных ранее или принятых к публикации другими изданиями.

# ИНДЕКСЫ

**00827**

для индивидуальных  
подписчиков

**008272**

для предприятий  
и организаций

3 | 2023

ТОМ ■ VOL. 20

ИНФОРМАТИКА ■ INFORMATICS

ISSN 1816-0301 (Print)



9 771816 030000