

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

ИНФОРМАТИКА

INFORMATICS

TOM 23
VOL.

3 | 2026

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).

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 23, № 3, июль-сентябрь 2026

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

Кругликов Сергей Владимирович, д-р воен. наук, канд. техн. наук, доцент,
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

Тузиков Александр Васильевич, 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)

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

Бондоловский Андрей Михайлович, канд. экон. наук, ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Голуб Юлия Игоревна, канд. техн. наук, ОИПИ НАН Беларуси (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, Центр «Квантовая оптика и квантовая информатика» Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

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

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)

Скляров 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)

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., БГУИР (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 Чандигарха (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 23, № 3, июль-сентябрь 2026

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

Сдано в набор 20.08.2026. Подписано в печать 21.09.2026. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 12,8. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 40 экз. Заказ 6.

Издатель и полиграфическое исполнение:

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 № 38200000016516 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. 23, no. 3, July-September 2026

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

Sergey V. Kruglikov, Dr. Sci. (Milit.), Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Deputy Editor-in-Chief

Alexander V. Tuzikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corr. Member of NASB,
UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Editorial Board

Sergey V. Ablameyko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of NASB, BSU (Minsk, Belarus)

Uladimir V. Anishchanka, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., SoftClub Ltd. (Minsk, Belarus)

Mikhail N. Bobov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., BSUIR (Minsk, Belarus)

Andrei M. Bandalouski, Cand. Sci. (Econ.), UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Yuliya I. Golub, Cand. Sci. (Eng.), UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Alexandre B. Dolgui, Dr. Sci. (Eng.), Prof., IMT Atlantique (Nantes, France)

Alexander N. Dudin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

Alexey A. Karpov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., SPII RAS (Saint Petersburg, Russia)

Sergey Ya. Kilin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Academician of NASB, Center of Quantum Optics and Quantum
Information of B. I. Stepanov Institute of Physics NASB (Minsk, Belarus)

Mikhail Y. Kovalyov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corr. Member of NASB, UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Viktor V. Krasnoproshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

Alexander M. Krot, Dr. Sci. (Eng.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Nikolai A. Likhoded, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

Petr P. Matus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Mathematics of NASB (Minsk, Belarus)

Valery A. Sklyarov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., University of Aveiro (Aveiro, Portugal)

Yuri N. Sotskov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Yuriy S. Kharin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Academician of NASB, RI APMI BSU (Minsk, Belarus)

Ljudmila D. Cheremisinova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., BSUIR (Minsk, Belarus)

Alexander F. Cherniavsky, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of NASB, A. N. Sevchenko IAPP BSU (Minsk, Belarus)

Vyacheslav N. Yarmolik, Dr. Sci. (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. 23, no. 3, July-September 2026

Issue Head *Sviatlana S. Maiseichyk*

Editor *Halina B. Hancharenka*

Computer Imposition *Volha B. Butsevich*

Sent for press 20.08.2026. Output 21.09.2026. Format 60×84 1/8. Offset paper. Riesography.

Printed sheets 12,8. Publisher's signatures 10,0. Circulation 40 copies. Order 6.

Publisher and printing execution:

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. 38200000016516 dated 18.12.13.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

Козлов А. А., Абламейко С. В. Модифицированная архитектура DeepLabV3+ с интеграцией глобального контекста и контрастивного обучения с учителем для семантической сегментации изображений сверхвысокого разрешения 7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Гущинский Н. Н., Ковалев М. Я., Розин Б. М. Совместная оптимизация размещения разнородной зарядной инфраструктуры, маршрутизации разнотипных электробусов и расписаний зарядки 24

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Жуковец М. В. Развитие компьютерной технологии моделирования остаточных сварочных явлений..... 49

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Сидоренко А. В., Сергеев И. В. Постквантовое шифрование на основе хаотической системы и принципа кубика Рубика 62

Крез К. С., Шнейдеров Е. Н., Галяк И. П., Ефименко Д. Д. Трехвекторный алгоритм обнаружения русскоязычных нейросетевых текстовых фрагментов на основе вероятностного анализа 76

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Сьянов Д. А. Вероятностный трансформер для предиктивного мониторинга редакционного процесса..... 92

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ

Абламейко Сергей Владимирович (к 70-летию со дня рождения) 107

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

CONTENTS

SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

Kozlov A. A., Ablameyko S. V. Modified DeepLabV3+ architecture with global context integration and supervised contrastive learning for semantic segmentation of ultra-high-resolution image..... 7

MATHEMATICAL MODELING

Guschinsky N. N., Kovalyov M. Y., Rozin B. M. Joint optimization of heterogeneous charging infrastructure location, heterogeneous electric bus routing and charging scheduling..... 24

COMPUTER-AIDED DESIGN

Zhukavets M. V. Development of computer technology for modeling residual welding phenomena 49

INFORMATION TECHNOLOGIES

Sidorenko A. V., Sergeev I. V. Post-quantum image encryption based on a chaotic system and the Rubik's cube principle 62

Krez K. S., Shneiderov Y. N., Galyak I. P., Efimenko D. D. A three-vector algorithm for detecting Russian-language neural-network-generated text fragments based on probabilistic analysis 76

INTELLIGENT SYSTEMS

Syanov D. A. A probabilistic transformer for predictive monitoring of editorial process 92

SCIENTISTS OF BELARUS

Ablameyko Sergey Vladimirovich (on the 70th anniversary of his birth) 107

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

УДК 004.93
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-7-23>

Поступила в редакцию | Received 17.04.2026
Подписана в печать | Accepted 11.05.2026
Опубликована | Published 30.09.2026

Модифицированная архитектура DeepLabV3+ с интеграцией глобального контекста и контрастивного обучения с учителем для семантической сегментации изображений сверхвысокого разрешения

А. А. Козлов✉, С. В. Абламейко
✉E-mail: anatoly.kozlov.ak@yandex.ru

*Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целью исследования является разработка современного метода семантической сегментации видеокадров сверхвысокого разрешения (4K) в области задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с помощью модификации сверточной нейронной сети DeepLabV3+.

Методы. Метод направлен на решение двух критических проблем: ограниченности рецептивного поля модели при работе с локальными фрагментами изображения в силу больших затрат видеопамяти графических процессоров и некачественного разделения классов со схожими цветовыми характеристиками и текстурой. Базовая архитектура была дополнена двумя модулями механизма внимания для улучшения локализации объектов, а стандартная функция потерь cross entropy – алгоритмом контрастивного обучения с учителем (Supervised Contrastive Learning, SupCon) для лучшего разделения схожих классов. В Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP)-модуль была встроена линейная модуляция (Feature-wise Linear Modulation, FiLM) для внедрения глобального контекста в виде признаков, полученных из исходного изображения.

Результаты. Результаты проведенных экспериментов показали, что предложенный подход успешно справляется с минимизацией артефактов на границах классов, обладает высокой способностью различать визуально схожие классы, а также повышает точность сегментации в условиях специфического набора данных. Предложенная архитектура превосходит базовую по метрике mean Intersection over Union на 0,45 %.

Заключение. Разработанная модификация DeepLabV3+ позволяет эффективно решать задачи семантической сегментации изображений сверхвысокого разрешения в области ДЗЗ, обеспечивая высокую точность при незначительном увеличении вычислительной сложности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, сверточные нейронные сети, семантическая сегментация, контрастивное обучение, мониторинг терриконов, механизм внимания

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам научно-исследовательской лаборатории прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета за предоставленное оборудование и данные для проведения эксперимента.

Для цитирования. Козлов, А. А. Модифицированная архитектура DeepLabV3+ с интеграцией глобального контекста и контрастивного обучения с учителем для семантической сегментации изображений сверхвысокого разрешения / А. А. Козлов, С. В. Абламейко // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 3. – С. 7–23. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-7-23>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Modified DeepLabV3+ architecture with global context integration and supervised contrastive learning for semantic segmentation of ultra-high-resolution image

Anatoly A. Kozlov[✉], Sergey V. Ablameyko

[✉]E-mail: anatoly.kozlov.ak@yandex.ru

*Belarusian State University,
av. Nezavisimosti, 4, Minsk, 220030, Belarus*

Abstract

Objectives. We propose a modern method for semantic segmentation of ultra-high-resolution (4K) video frames in the field of Earth remote sensing using a modification of the DeepLabV3+ convolutional neural network.

Methods. The method is aimed at solving two critical problems: the limited receptive field of the model when working with local image fragments due to GPU memory constraints, and the poor separation of classes with similar color characteristics and texture. The baseline architecture was supplemented with two attention mechanism modules to improve object localization, and the standard cross-entropy loss function was supplemented with a Supervised Contrastive Learning (SupCon) algorithm for better separation of similar classes. Feature-wise Linear Modulation (FiLM) was embedded into the Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) module to introduce global context in the form of features extracted from the original image.

Results. The results of the experiments showed that the proposed approach successfully minimizes artifacts at class boundaries, has a high ability to distinguish visually similar classes, and improves segmentation accuracy under the conditions of a specific dataset. The proposed architecture outperforms the baseline by 0,45 % in terms of mean Intersection over Union.

Conclusion. The developed modification of DeepLabV3+ effectively addresses the challenges of semantic segmentation of ultra-high-resolution images in the field of Earth remote sensing, achieving high accuracy with a negligible increase in computational complexity.

Keywords: Earth remote sensing, convolutional neural networks, semantic segmentation, contrastive learning, tailings pond monitoring, attention mechanism

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the staff of the Research Laboratory of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanics and Mathematics of Belarusian State University for providing the equipment and data used in the experiment.

For citation. Kozlov A. A., Ablameyko S. V. *Modified DeepLabV3+ architecture with global context integration and supervised contrastive learning for semantic segmentation of ultra-high-resolution image*. *Informatika [Informatics]*, 2026, vol. 23, no. 3, pp. 7–23 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-7-23>.

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

Введение

Внедрение новых технологий в область мониторинга технических объектов, в частности шламохранилищ, является приоритетной задачей в деле предотвращения экологических катастроф и чрезвычайных ситуаций [1, 2]. Катастрофические последствия обвалов объектов такого рода в Бразилии и Канаде показывают, что и сейчас существуют высокие риски аварий на шламохранилищах [3, 4]. Традиционные методы контроля могут оказаться недостаточными для предотвращения подобных катастроф, поэтому в настоящее время активно ведутся исследования по внедрению глубокого обучения в мониторинг и задачи ДЗЗ [5].

Республика Беларусь является одним из крупнейших производителей калийных удобрений, и проблема мониторинга прорыва терриконов и подтопления окружающих сельскохозяйственных угодий стоит очень остро [6]. Именно поэтому развитие методов глубокого обучения для сегментации кадров сверхвысокого разрешения является важным направлением в области искусственного интеллекта и ДЗЗ.

Исследования в области анализа данных ДЗЗ в последние годы почти полностью проводятся с помощью методов глубокого обучения. Первые успехи в области семантической сегментации были связаны с появлением полносверточных нейронных сетей [7] и архитектуры U-Net [8]. С тех пор исследователи в области компьютерного зрения добились больших успехов в разработке архитектур для решения этой задачи. Среди них выделяются модели, которые решают проблему недостатка контекста и ограниченности рецептивного поля. К таким относятся PSPNet [9], которая использует Pyramid Pooling Module, и семейство DeepLab (V1, V2, V3, V3+) [10–13], где внимание уделено расширению рецептивного поля за счет расширенных сверток и ASPP-модуля. Визуальные трансформеры также показали свою эффективность и получают широкое распространение в современных исследованиях [14, 15], но их применение требует огромного объема видеопамяти, что является серьезным аргументом против их использования для сегментации изображений сверхвысокого разрешения.

Отсутствие механизмов внимания у классических архитектур сверточных нейронных сетей приводит к тому, что модели теряют информацию на том этапе, когда карты признаков максимально сжимаются в один вектор. Это явилось серьезной мотивацией для разработки механизмов внимания. Так же, как зрение человека фокусируется на главном объекте, интересующем его на данный момент, механизмы внимания позволили нейронным сетям концентрироваться на информативных признаках, все больше игнорируя фон и шум. В задачах ДЗЗ это критически необходимо для успешной сегментации [16].

Самым простым существующим на данный момент подходом является блок Squeeze-and-Excitation (SE) [17]. Недостаток этого блока заключается в том, что он фокусируется исключительно на межканальных зависимостях, игнорируя пространственные. Более продвинутые модули (Convolutional Block Attention Module, CBAM) [18] объединили в себе канальное и пространственное внимание, но у них были большие траты вычислительной мощности.

Одним из современных механизмов внимания является модуль механизма внимания (Coordinate Attention, CA) [19]. Этот легковесный модуль кодирует и встраивает в карту признаков координаты горизонтальной и вертикальной осей. Он позволяет эффективно уточнять сегментацию на границах классов со сложной геометрией, не сильно добавляя количество параметров модели. Данный компромиссный вариант является наиболее эффективным.

С точки зрения многомерного анализа можно рассматривать выходные признаки сверточной нейронной сети как элементы векторного пространства. Вполне очевидным фактом является то, что визуально схожие классы будут находиться в этом пространстве очень близко друг к другу. Таким образом, обучение модели с применением традиционной функции потерь (cross-entropy) может приводить к ошибочной классификации пикселей, обладающих схожими цветовыми характеристиками, но принадлежащих к разным семантическим классам. Например, в рассматриваемом случае это вода и небо, а также шламохранилище и регион слежения, который является частью шламохранилища. Решением данной проблемы стало внедрение методов контрастивного обучения [20, 21]. Алгоритм SupCon позволяет обучать модель таким образом, чтобы векторы признаков пикселей одного класса стягивались в пространстве признаков, а расстояние между векторами разных классов увеличивалось [22]. В случае специфического набора данных использование алгоритма SupCon повысит устойчивость модели к шуму и улучшит точность сегментации.

После тщательного анализа существующих подходов для решения описанных выше проблем авторы предлагают дополнить современную архитектуру CHC DeepLabV3+ следующими методами:

- интеграцией глобального контекста с помощью модуля FiLM в виде вектора признаков, полученного из исходного изображения, для лучшего понимания моделью расположения локального фрагмента относительно всей сцены;
- добавлением блоков CA для уточнения сегментации границ классов;
- использованием обучения с помощью SupCon для эффективного разделения визуально схожих классов.

1. Методология и архитектура

В качестве модели для извлечения признаков была выбрана архитектура ResNet-50 [23]. Выбор ResNet-50 обоснован тем, что данная архитектура – это оптимальное решение с точки зрения выбора между вычислительными затратами и точностью. Данный факт подтверждается большим количеством работ, содержащих в себе сравнительный анализ качества работы моделей на одинаковых данных. Согласно результатам сравнительного анализа в области классификации медицинских изображений [24] ResNet-101 дает всего 0,23 % прироста к точности при том, что имеет почти в два раза больше параметров. Более того, некоторые работы демонстрируют сопоставимую точность моделей ResNet-50 и ResNet-101 [25, 26]. Все это подтверждает целесообразность выбора менее ресурсоемкой архитектуры.

Избранным механизмом внимания в данной работе является модуль CA. Его превосходство над другими существующими механизмами внимания подтверждено экспериментально [27]. В отличие от существующих распространенных методов SE [28] и CBAM, CA сочетает в себе учет пространственной информации и захват длинных за-

висимостей в картах признаков. Также его значимым преимуществом является легковесность, а эффективность в задачах ДЗЗ подтверждена надежными источниками [29]. Эти факты позволяют сделать вывод о том, что выбор СА в качестве механизма внимания является наиболее эффективным решением для семантической сегментации и ДЗЗ.

В настоящей работе стандартная функция потерь cross entropy была дополнена контрастивным обучением с учителем SupCon. Другие методы контрастивного обучения самоконтролируемые, т. е. не используют разметку, что не подходит для рассматриваемой ситуации, когда в изображении встречаются визуально схожие классы. Эффективность метода контрастивного обучения с учителем подтверждена экспериментально [30], а также успешно применима в ДЗЗ.

1.1. Стратегия фрагментации и многомасштабной обработки. В настоящее время наиболее распространенные аппаратные ускорители (графические процессоры) имеют объем видеопамати в 24 Гб. Библиотека torchinfo позволила оценить количество видеопамати, которое необходимо для запуска процесса обучения или инференса на одном элементе набора данных. Для обработки моделью, являющейся предложенной модификацией DeerLabV3+, видеокадров разрешения 4K необходимо около 40 Гб видеопамати. Существуют серверные решения, которые позволяют производить такие вычисления, но авторы ограничены возможностями графического процессора NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti, который обладает 12 Гб видеопамати. В связи с этим к видеокадрам была применена стратегия декомпозиции, или фрагментации (деления на фрагменты).

Для обработки данных было принято решение применить стратегию разбиения изображения на локальные фрагменты размерностью 512×512 . Выбор данной размерности обусловлен необходимостью достижения баланса между сохранением локальной контекстной информации фрагмента и вычислительными затратами его обработки. Непосредственно разбиение осуществляется по регулярной сетке с шагом в 400 пикселей. Это обеспечивает перекрытие в 112 пикселей – 21,8 % от размера фрагмента. Перекрытие позволяет минимизировать наличие разрывов областей классов на границах фрагментов в результате сегментации, так как при формировании прогноза целых изображений в пересечениях фрагментов выходные значения модели суммируются и усредняются. Координаты левого верхнего угла фрагментов по ширине задаются последовательностью $x \in \{0, 400, 800, \dots, 2800, 3200, 3328\}$. Последний фрагмент смещается с целью выравнивания по правой границе кадра. Аналогичным образом разбиение реализовано и по высоте кадра и задается последовательностью $y \in \{0, 400, 800, \dots, 1200, 1600, 1650\}$. Следовательно, фрагменты целиком покрывают все изображение.

В связи с ограничениями вычислительных мощностей вынужденное применение стратегии фрагментации создает проблему отсутствия глобального контекста. Поле зрения модели ограничено локальным фрагментом, что может привести к неточностям сегментации. Способность модели к дифференциации классов, имеющих схожие цветовые характеристики и текстуру, ухудшается. Особенно это вероятно для ситуации, когда фрагмент оказался внутри области класса.

1.2. Интеграция глобального контекста. Схема интеграции глобального контекста в качестве модификации архитектуры модели показана на рис. 1. Исходный кадр подвергается обработке с помощью легковесной модели MobileNetV3 [31], благодаря чему получается

вектор признаков размерностью 960, в котором содержится глобальная информация. Затем этот вектор проходит через двуслойную нейронную сеть, которая уже является частью основной модели предложенной модификации. В итоге получаются два вектора размерностями 256 каждый.

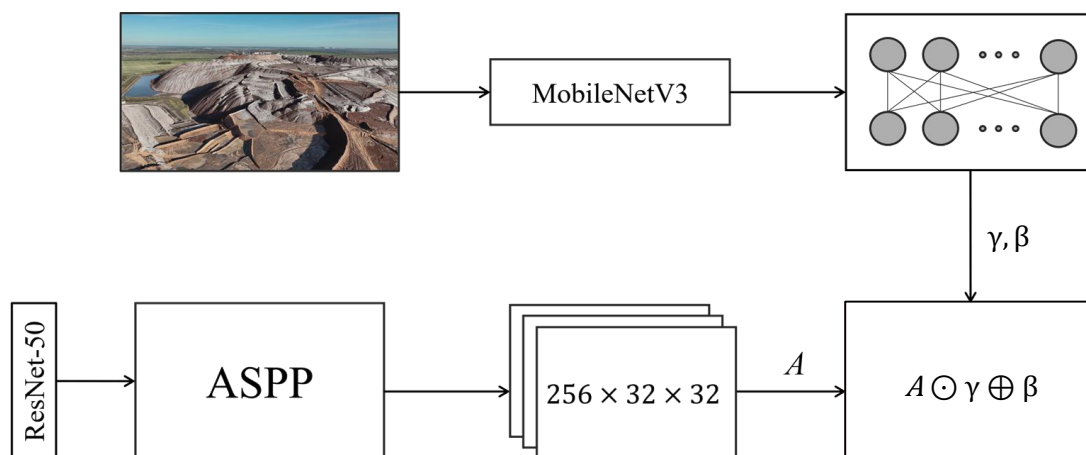


Рис. 1. Схема интеграции глобального контекста

Fig. 1. Global context integration diagram

Полученные векторы комбинируются с выходной картой признаков модуля ASPP с помощью блока FiLM [32], что можно записать в виде следующего выражения:

$$\hat{F} = \gamma \odot F_{ASPP} \oplus \beta, \quad (1)$$

где $\odot$ – поэлементное умножение; $\oplus$ – поэлементное сложение; γ и β – векторы с обучаемыми параметрами, которые получаются из глобального контекста, а F_{ASPP} – выходная карта признаков ASPP-модуля. Данная модификация позволяет изменять активации нейронной сети на основе глобальной специфики конкретного видеокadra.

1.3. Координатно-ориентированные механизмы внимания. С целью повышения точности локализации геометрически сложных объектов в архитектуру внедрены блоки механизма внимания. На рис. 2 представлена схема работы этого модуля.

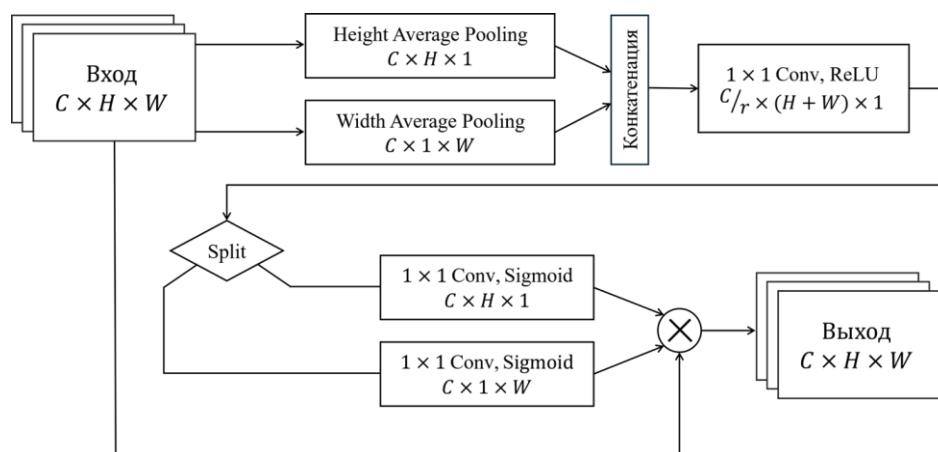


Рис. 2. Схема механизма внимания

Fig. 2. Coordinate Attention mechanism diagram

Механизм внимания реализует эффективную пространственную селекцию признаков путем декомпозиции глобального пулинга на две одномерные операции вдоль осей. Полученные дескрипторы координат проходят через общую нелинейную трансформацию, что позволяет модели вычислять весовые коэффициенты с учетом кросс-координатных зависимостей.

Применение двух последовательных масок внимания обеспечивает точную локализацию объектов и подавление фонового шума, сохраняя при этом высокую вычислительную эффективность.

1.4. Внедрение контрастивного обучения. Суть контрастивного обучения состоит в том, что выходные признаки модели проецируются в конкретное линейное пространство признаков. Вычисляя схожесть векторов в рамках этого пространства, модель обучается так, чтобы векторы одинаковых классов сближались, а разных – отдалялись. Для реализации модели на ее выход встраивается проекционный модуль, который преобразует выходную карту признаков модели в векторы-признаки. Иначе говоря, именно он проецирует признаки в конкретное векторное пространство. В итоге для каждого пикселя исходного фрагмента размерностью 512×512 получаются векторы размерностью 128 (рис. 3).

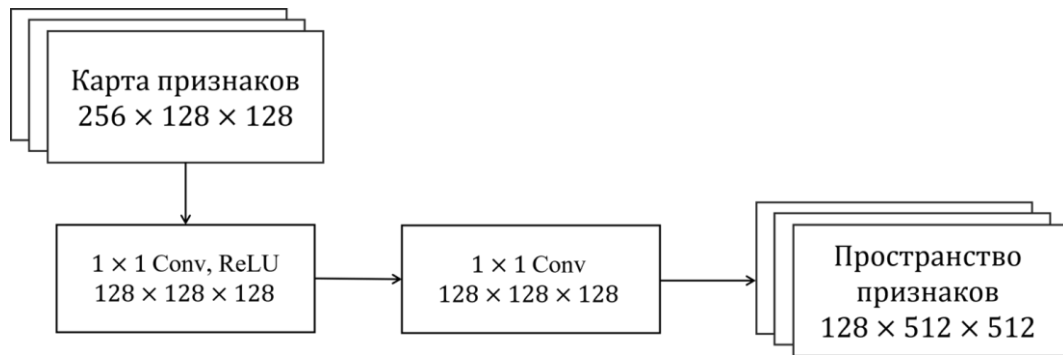


Рис. 3. Схема проекционного модуля

Fig. 3. Projection module diagram

Сам алгоритм заключается в том, что все выбранные векторы проецируются на многомерную единичную сферу и с помощью скалярного произведения вычисляется косинусовое сходство между всеми векторами. Таким образом, чем меньше расстояние между векторами, которые принадлежат одному классу, тем меньше функция потерь SupCon. Все вышесказанное можно выразить с помощью формулы

$$L_i = \frac{-1}{|P(i)|} \sum_{p \in P(i)} \log \frac{\exp(z_i \cdot z_p / \tau)}{\sum_{a \in A(i)} \exp(z_i \cdot z_a / \tau)}, \quad (2)$$

где z_i – нормализованные векторы-признаки; $P(i)$ – подмножество выбранных векторов, принадлежащих тому же классу; $A(i)$ – множество выбранных векторов, исключая вектор, для которого в данный момент проводятся вычисления; τ – параметр, который регулирует интенсивность влияния расстояния на обучение.

Естественно, применять алгоритм ко всем векторам будет невозможно с точки зрения нагрузки на графический процессор, ведь тогда нужно будет считать функцию потерь попарно для всех 262 144 векторов. Поэтому для оптимизации вычислительных затрат каждый раз будут выбираться 128 случайных векторов и SupCon будет применяться только к ним.

В итоге получим комбинацию двух функций потерь, сконструированную следующим образом:

$$Loss = Loss_{cross\ entropy} + \omega \cdot Loss_{SupCon}. \quad (3)$$

1.5. Предлагаемая архитектура модификации. На рис. 4 изображена схема предложенной модификации. Проекционный модуль в конце декодера включается только во время обучения модели. Два модуля механизма внимания имеют разное количество каналов входных карт признаков. Первый модуль, расположенный перед конкатенацией низкоуровневых и высокоуровневых признаков, предполагает наличие 48 каналов у входной карты признаков, а второй модуль – 256 каналов.

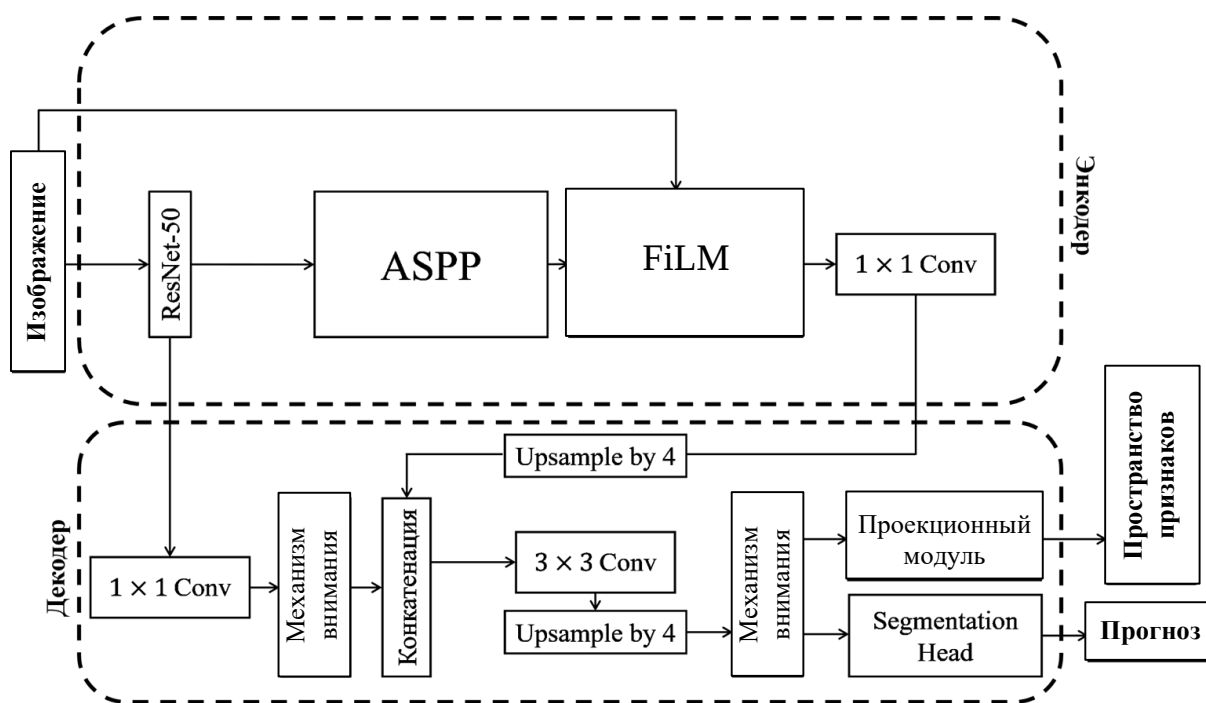


Рис. 4. Предложенная модификация архитектуры DeepLabV3+ с интеграцией механизмов внимания, адаптивной калибровки признаков и проекционного модуля контрастивного обучения

Fig. 4. The proposed modification of the DeepLabV3+ architecture, with integration of attention mechanisms, adaptive feature calibration, and a projection module for contrastive learning

В начале модели расположен энкодер ResNet-50. У данной модели две выходные карты признаков: низкого уровня (размерностью $256 \times 128 \times 128$) и высокого (размерностью $2048 \times 32 \times 32$). Карта признаков высокого уровня поступает на вход модуля ASPP, который в свою очередь имеет выходную карту признаков размерностью $256 \times 32 \times 32$.

В модуле FiLM объединяются выходная карта признаков модуля ASPP и сжатый при помощи MobileNetV3 и двуслойной нейронной сети полный 4K-кадр. Интеграция глобального контекста подробно описана в подразд. 1.2. Выходная карта признаков модуля FiLM имеет ту же размерность, что и выходная карта признаков модуля ASPP.

Карта уровней низкого уровня проходит через свертку 1×1 , уменьшая число каналов, и попадает на вход в первый блок СА размерностью $48 \times 128 \times 128$. Модуль СА не меняет размерность карты признаков, а лишь применяет к карте признаков веса внимания. Далее конкатенируются высоко- и низкоуровневые признаки. В результате конкатенации получается карта признаков размерностью $304 \times 128 \times 128$.

Входная и выходная карты признаков второго модуля СА имеют размерность $256 \times 128 \times 128$. После модуля СА признаки поступают на вход в голову сегментации при инференсе, а при обучении – еще и в проекционный модуль.

2. Эксперимент и результаты

2.1. Описание набора данных. Набор данных для проведения эксперимента был сформирован из 110 размеченных видеокладов сверхвысокого разрешения. Точное разрешение – 3840×2160 пикселей. Кадры получены профессиональной съемкой с помощью беспилотного летательного аппарата. Каждый кадр разбивались на 60 фрагментов размером 512×512 пикселей описанным выше способом. Таким образом, набор данных состоит из 6600 элементов.

2.2. Конфигурация обучения и метрики оценки качества. Обучение было реализовано с помощью программного интерфейса PyTorch и библиотеки CUDA для запуска вычислений на аппаратных ускорителях. В качестве такого ускорителя использовался графический процессор NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti с 12 Гб видеопамяти.

В табл. 1 представлены гиперпараметры, использованные при обучении исследуемых моделей. Для обеспечения сопоставимости результатов скорость обучения (Learning rate) была зафиксирована на одном уровне для всех архитектур. Размер батча выбран в соответствии с максимальным количеством доступной видеопамяти. Обучение проводилось в течение 100 эпох. Стоит отметить, что для предложенной модификации введены дополнительные параметры: температурный коэффициент τ и весовой коэффициент ω , которые используются в функции контрастивных потерь.

Таблица 1

Список гиперпараметров для обучения сравниваемых моделей

Table 1

Hyperparameters for training the compared models

	Learning rate	Batch size	Epochs	τ	ω
Модификация	0,0004	12	100	0,7	0,1
DeepLabV3+	0,0004	14	100	—	—
U-Net++	0,0004	4	100	—	—

Для количественной оценки качества сегментации выбраны следующие метрики: средний коэффициент пересечения над объединением (mIoU), коэффициент сходства Дайса (Dice Coefficient) и общая точность.

Коэффициент mIoU отражает среднее отношение площади пересечения предсказанной маски с эталонной к площади их объединения по всем классам. Коэффициент сходства Дайса оценивает меру близости двух выборок и более чувствителен к корректному выделению мелких структур в условиях дисбаланса классов.

Общая точность (Overall Accuracy) рассчитывается как доля пикселей изображения, классифицированных верно, что позволяет оценить общую эффективность модели на всем наборе данных.

Результаты сравнительной оценки качества сегментации и вычислительной сложности моделей приведены в табл. 2. Предложенная модификация демонстрирует наилучшие показатели по всем метрикам, достигая значения mIoU 98,85 %, что на 0,45 % выше базовой архитектуры DeepLabV3+ и на 3,08 % выше модели U-Net++. Столь высокие показатели свидетельствуют об эффективности внедрения механизмов внимания и интеграции глобальных признаков.

По количеству параметров представленная модель лишь на 3 % превосходит стандартную. При этом она практически в два раза легче архитектуры U-Net++, что делает ее более пригодной для развертывания в системах реального времени при значительно более высокой точности.

Таблица 2

Результаты оценки качества сравниваемых моделей

Table 2

Performance evaluation results of the compared models

	mIoU, %	Dice, %	Overall Accuracy, %	Total parameters
Модификация	98,85	99,42	99,44	27 490 000
DeepLabV3+	98,40	99,19	99,23	26 680 000
U-Net++	95,77	97,77	98,78	48 990 000

2.3. Визуальный анализ результатов. Качественный анализ результатов сегментации видеокадра (рис. 5) показывает, что предложенные модификации значительно улучшают топологическую связность сегментированных объектов. В то время как базовый DeepLabV3+ демонстрирует разрывы в узких структурах (например, линия класса фона на увеличенных фрагментах), представленная модель сохраняет непрерывную и четкую границу. Это улучшение в первую очередь связано с механизмом СА, который обеспечивает точную пространственную локализацию, и модулем FiLM, интегрирующим глобальный контекст для предотвращения локальных ошибок классификации. Кроме того,

использование SupCon обеспечивает лучшую различимость классов, что приводит к более плавным переходам и снижению шума на стыках нескольких классов. Такие визуальные улучшения согласуются с наблюдаемым увеличением метрики mIoU на 0,45 %, подтверждая, что модель лучше улавливает геометрию сцены.

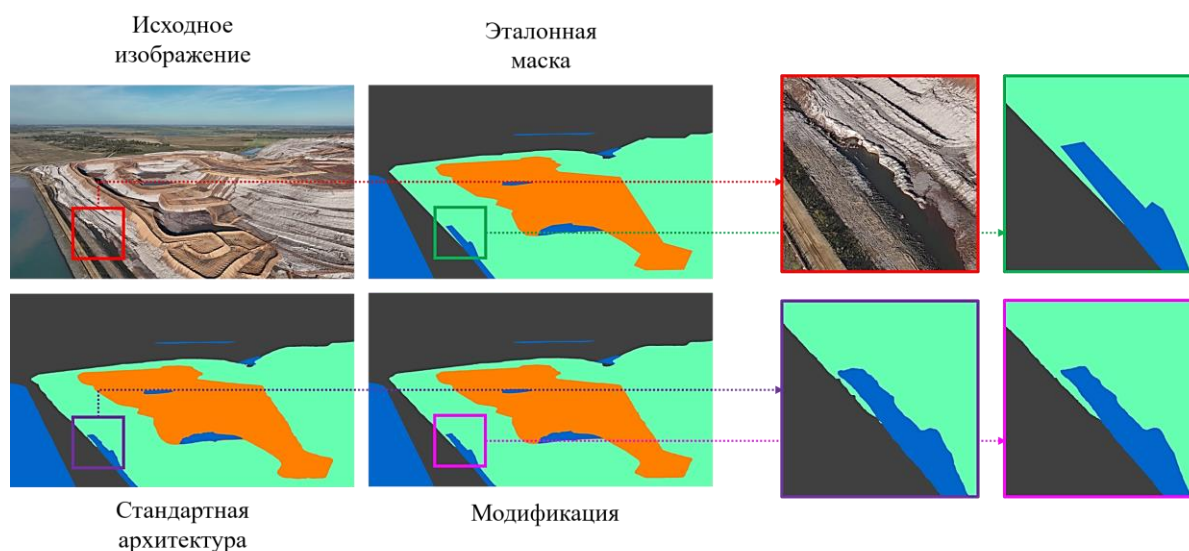


Рис. 5. Результаты сегментации видеокadra

Fig. 5. Video frame segmentation results

Заключение

В работе представлен модифицированный метод семантической сегментации видеокadров сверхвысокого разрешения (4K) для задач мониторинга шламохранилищ. Предложенная архитектура на базе DeepLabV3+ эффективно решает проблему ограниченного рецептивного поля при обработке локальных фрагментов изображения за счет интеграции глобального контекста.

Разработан комбинированный подход к обучению, объединяющий стандартную кросс-энтропию и функцию потерь SupCon. Это дало возможность существенно повысить сепарабельность визуально схожих классов, минимизировав ошибки классификации.

Адаптация модели под конкретные условия съемки позволила достичь прироста метрики mIoU на 0,45 % по сравнению с базовой архитектурой DeepLabV3+.

Практическая значимость работы заключается в возможности автоматизации экологического контроля промышленных объектов, что снижает риск возникновения техногенных аварий.

Вклад авторов. А. А. Козлов разработал программное обеспечение для обучения моделей, предложил архитектурные модификации, выполнил разметку набора данных, провел вычислительные эксперименты, осуществил анализ и интерпретацию результатов. С. В. Абламейко сформулировал задачу, установил научные контакты для получения исходных данных и утвердил окончательную версию статьи для публикации.

Список использованных источников

1. Цзян, Ч. Выявление структуры землепользования в зоне влияния Солигорского калийного комбината по данным дистанционного зондирования / Ч. Цзян, А. Н. Червань // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 51–63.
2. Roche, C. Mine tailings storage: Safety is no accident / C. Roche, K. Thygesen, E. Baker // Rapid Response Assessment / United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. – Arendal, 2017. – P. 6–10.
3. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil / L. H. S. Rotta, E. Alcântara, E. Park [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2020. – Vol. 90. – Art. 102119. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243420300192?via%3Dihub> (date of access: 16.03.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>.
4. Santamarina, J. C. Why coal ash and tailings dam disasters occur / J. C. Santamarina, L. A. Torres-Cruz, R. C. Bachus // Science. – 2019. – Vol. 364, iss. 6440. – P. 526–528. – <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>.
5. Mining and tailings dam detection in satellite imagery using deep learning / R. Balaniuk, O. Isupova, S. Reece // Sensors. – 2020. – Vol. 20, no. 23. – Art. 6936. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6936> (date of access: 16.03.2026). – <https://doi.org/10.3390/s20236936>.
6. Стельмах, В. И. Экологические проблемы добычи калийных солей и некоторые пути их преодоления / В. И. Стельмах // Обеспечение экономической безопасности Республики Беларусь: теория и практика : материалы Респ. науч.-практ. конф., Минск, 19 дек. 2019 г. / Акад. М-ва внутр. дел Респ. Беларусь. – Мн., 2019. – С. 103–105.
7. Fully convolutional networks for semantic segmentation / J. Long, E. Shelhamer, T. Darrell // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, Massachusetts, USA, 7–12 June 2015. – Boston, 2015. – P. 3431–3440. – <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298965>.
8. Ronneberger, O. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 : 18th Intern. Conf., Munich, 5–9 Oct. 2015 / ed.: N. Navab [et al.]. – Cham, 2015. – Pt. III. – P. 234–241. – (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 9351). – https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.
9. Pyramid scene parsing network / H. Zhao, J. Shi, X. Qi [et al.] // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, Hawaii, USA, 21–26 July 2017. – Honolulu, 2017. – P. 2881–2890. – <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.660>.
10. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation / L. C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou [et al.] // Proc. of the European Conf. on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, 8–14 Sept. 2018. – Munich, 2018. – P. 801–818. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_49.
11. DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs / L. C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018. – Vol. 40, iss. 4. – P. 834–848. – <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2699184>.
12. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation / L.-C. Chen, G. Papandreou, F. Schroff, H. Adam. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.05587> (date of access: 16.03.2026). – <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.05587>.
13. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation / L. C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou [et al.] // Proc. of the European Conf. on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, 8–14 Sept. 2018. – Munich, 2018. – P. 801–818. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_49.

14. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale / A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov [et al.] // Intern. Conf. on Learning Representations (ICLR), Vienna, Austria, 4 May 2021. – Vienna, 2021. – P. 1–21. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>.
15. Rethinking semantic segmentation from a sequence-to-sequence perspective with transformers / S. Zheng, J. Lu, H. Zhao [et al.] // Proc. of the IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Nashville, TN, USA, 20–25 June 2021. – Nashville, 2021. – P. 6881–6890. – <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00681>.
16. Attention mechanisms in semantic segmentation of remote sensing images / V. V. Godase, S. Takale, R. Ghodake, A. Mulani // Journal of Advancement in Electronics Signal Processing. – 2025. – Vol. 2. – P. 45–58.
17. Hu, J. Squeeze-and-excitation networks / J. Hu, L. Shen, G. Sun // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, UT, USA, 18–22 June 2018. – Salt Lake City, 2018. – P. 7132–7141. – <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00745>.
18. CBAM: Convolutional block attention module / S. Woo, J. Park, J. Y. Lee, I. S. Kweon // Proc. of the European Conf. on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, 8–14 Sept. 2018. – Munich, 2018. – P. 3–19. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_1.
19. Hou, Q. Coordinate attention for efficient mobile network design / Q. Hou, D. Zhou, J. Feng // Proc. of the IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Nashville, TN, USA, 20–25 June 2021. – Nashville, 2021. – P. 13713–13722. – <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01350>.
20. Big self-supervised models are strong semi-supervised learners / T. Chen, S. Kornblith, K. Swersky [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2020. – Vol. 33. – P. 20735–20747. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10029>.
21. A comprehensive survey on contrastive learning / H. Hu, X. Wang, Y. Zhang [et al.] // Neurocomputing. – 2024. – Vol. 610. – Art. 128645. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925231224014164?via%3Dihub> (date of access: 16.03.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128645>.
22. Supervised contrastive learning / P. Khosla, P. Teterwak, C. Wang [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2020. – Vol. 33. – P. 18661–18673. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.11362>.
23. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016. – Las Vegas, 2016. – P. 770–778. – <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
24. Comparative analysis of deep learning architectures for medical image classification / P.-N. Bui, D.-T. Le, J. Bum [et al.] // Bioengineering. – 2023. – Vol. 10, iss. 10. – Art. 1249. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10669434/> (date of access: 16.03.2026). – <https://doi.org/10.3390/bioengineering10101249>.
25. Kansal, K. ResNet-based deep learning approaches for histopathological breast cancer classification / K. Kansal, A. Singh, D. Srivastava, K. Kansal // 2025 Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Emerging Technologies (ICAJET), Bhubaneswar, Odisha, India, 28–30 Aug. 2025. – Bhubaneswar, 2025. – P. 1–4. – <https://doi.org/10.1109/ICAJET.2025.11210953>.
26. Kordemir, M. A mask R-CNN approach for detection and classification of brain tumours from MR images / M. Kordemir, K. K. Cevik, A. Bozkurt // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization. – 2024. – Vol. 11, iss. 7. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21681163.2023.2301391> (date of access: 16.03.2026). – <https://doi.org/10.1080/21681163.2023.2301391>.

27. A comparative analysis of attention mechanisms in 3D CNN-based hyperspectral image super-resolution / M. S. Zitouni, M. Q. Alkhatib, N. Aburaed, H. Ahmad // 2024 14th Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), Helsinki, Finland, 09–11 Dec. 2024. – Helsinki, 2024. – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2024.10876507>.
28. A new semantic segmentation method for remote sensing images integrating coordinate attention and SPD-Conv / Z. Yang, Q. Wu, F. Zhang [et al.] // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, iss. 5. – Art. 1037. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/15/5/1037> (date of access: 16.03.2026). – <https://doi.org/10.3390/sym15051037>.
29. Li, Z. A comparative study of Contrastive Self-Supervised Learning (CSSL): Methods, technologies, and applications / Z. Li // Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research. – 2025. – Vol. 10. – P. 92–97. – <https://doi.org/10.62051/2hgr2j26>.
30. Wang, Y. Multi-label guided supervised contrastive learning for earth observation pretraining / Y. Wang, C. M. Albrecht, X. X. Zhu // 2024 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Athens, Greece, 7–12 July 2024. – Athens, 2024. – P. 7568–7571. – <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10642289>.
31. Searching for MobileNetV3 / A. Howard, M. Sandler, B. Chen [et al.] // Proc. of the IEEE/CVF Intern. Conf. on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 27 Oct. – 02 Nov. 2019. – Seoul, 2019. – P. 1314–1324. – <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00140>.
32. FiLM: Visual reasoning with a general conditioning layer / E. Perez, F. Strub, H. de Vries [et al.] // Proc. of the AAAI Conf. on Artificial Intelligence, New Orleans, Louisiana, USA, 2–7 Febr. 2018. – New Orleans, 2018. – Vol. 32, iss. 1. – P. 3942–3951. – <https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11823>.

References

1. Jiang C., Chervan A. N. *Identification of land use structure in the zone of influence of the Soligorsk potash plant based on remote sensing data*. Prirodopolzovanie [Nature Management], 2025, no. 1, pp. 51–63 (In Russ.).
2. Roche C., Thygesen K., Baker E. Mine tailings storage: Safety is no accident. *Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. Arendal, 2017, pp. 6–10.
3. Rotta L. H. S., Alcântara E., Park E., Negri R. G., Lin Y. N. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, vol. 90, art. 102119. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243420300192?via%3Dihub> (accessed: 16.03.2026). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>.
4. Santamarina J. C., Torres-Cruz L. A., Bachus R. C. Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 2019, vol. 364, iss. 6440, pp. 526–528. <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>.
5. Balaniuk R., Isupova O., Reece S. Mining and tailings dam detection in satellite imagery using deep learning. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 23, art. 6936. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6936> (accessed 16.03.2026). <https://doi.org/10.3390/s20236936>.
6. Stelmakh V. I. *Environmental problems of potash salt mining and some solutions*. Obespechenie jekonomicheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus': teorija i praktika: materialy Respublikanskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 19 dekabrija 2019 g. [Ensuring the Economic Security of the Republic of Belarus: Theory and Practice: Proceedings of the Republican Scientific-practical Conference, Minsk, 19 December 2019]. Minsk, Akademija Ministerstva vnutrennih del Respubliki Belarus', 2019, pp. 103–105 (In Russ.).

7. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, Massachusetts, USA, 7–12 June 2015*. Boston, 2015, pp. 3431–3440. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298965>.
8. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 : 18th International Conference, Munich, 5–9 October 2015*. In N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, A. F. Frangi (eds.). Cham, 2015, pt. III, pp. 234–241 (Lecture Notes in Computer Science; vol. 9351). https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.
9. H. Zhao, Shi J., Qi X., Wang X., Jia J. Pyramid scene parsing network. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, Hawaii, USA, 21–26 July 2017*. Honolulu, 2017, pp. 2881–2890. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.660>.
10. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A. L. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected CRFs. *International Conference on Learning Representations (ICLR), San Diego, CA, USA, 7–9 May 2015*. San Diego, 2015, pp. 1–14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.7062>.
11. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A. L. DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, vol. 40, iss. 4, pp. 834–848. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2699184>.
12. Chen L.-C., Papandreou G., Schroff F., Adam H. *Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation*, 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1706.05587> (accessed: 16.03.2026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.05587>.
13. Chen L.-C., Zhu Y., Papandreou G., Schroff F., Adam H. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, 8–14 September 2018*. Munich, 2018, pp. 801–818. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_49.
14. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., ..., Houlsby N. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *International Conference on Learning Representations (ICLR), Vienna, Austria, 4 May 2021*. Vienna, 2021, pp. 1–21. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>.
15. Zheng S., Lu J., Zhao H., Zhu X., Luo Z., Wang Y. Rethinking semantic segmentation from a sequence-to-sequence perspective with transformers. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Nashville, TN, USA, 20–25 June 2021*. Nashville, 2021, pp. 6881–6890. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00681>.
16. Godase V. V., Takale S., Ghodake R., Mulani A. Attention mechanisms in semantic segmentation of remote sensing images. *Journal of Advancement in Electronics Signal Processing*, 2025, vol. 2, pp. 45–58.
17. Hu J., Shen L., Sun G. Squeeze-and-excitation networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, UT, USA, 18–22 June 2018*. Salt Lake City, 2018, pp. 7132–7141. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00745>.
18. Woo S., Park J., Lee J. Y., Kweon I. S. CBAM: Convolutional block attention module. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, 8–14 September 2018*. Munich, 2018, pp. 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_1.
19. Hou Q., Zhou D., Feng J. Coordinate attention for efficient mobile network design. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Nashville, TN, USA, 20–25 June 2021*. Nashville, 2021, pp. 13713–13722. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01350>.

20. Chen T., Kornblith S., Swersky K., Norouzi M., Hinton G. Big self-supervised models are strong semi-supervised learners. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2020, vol. 33, pp. 20735–20747. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10029>.
21. Hu H., Wang X., Zhang Y., Chen Q., Guan Q. A comprehensive survey on contrastive learning. *Neurocomputing*, 2024, vol. 610, art. 128645. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925231224014164?via%3Dihub> (accessed 16.03.2026). <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128645>.
22. Khosla P., Teterwak P., Wang C., Sarna A., Tian Y., ..., Krishnan D. Supervised contrastive learning. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2020, vol. 33, pp. 18661–18673. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.11362>.
23. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016*. Las Vegas, 2016, pp. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
24. Bui P.-N., Le D.-T., Bum J., Kim S., Song S. J., Choo H. Comparative analysis of deep learning architectures for medical image classification. *Bioengineering*, 2023, vol. 10, iss. 10, art. 1249. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10669434/> (accessed 16.03.2026). <https://doi.org/10.3390/bioengineering10101249>.
25. Kansal K., Singh A., Srivastava D., Kansal K. ResNet-based deep learning approaches for histopathological breast cancer classification. *2025 International Conference on Artificial Intelligence and Emerging Technologies (ICAIET), Bhubaneswar, Odisha, India, 28–30 August 2025*. Bhubaneswar, 2025, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICAIET.2025.11210953>.
26. Kordemir M., Cevik K. K., Bozkurt A. A mask R-CNN approach for detection and classification of brain tumours from MR images. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 2024, vol. 11, iss. 7. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21681163.2023.2301391> (accessed 16.03.2026). <https://doi.org/10.1080/21681163.2023.2301391>.
27. Zitouni M. S., Alkhatib M. Q., Aburaed N., Ahmad H. A comparative analysis of attention mechanisms in 3D CNN-based hyperspectral image super-resolution. *2024 14th Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), Helsinki, Finland, 09–11 December 2024*. Helsinki, 2024, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2024.10876507>.
28. Yang Z., Wu Q., Zhang F., Zhang X., Chen X., Gao Y. A new semantic segmentation method for remote sensing images integrating coordinate attention and SPD-Conv. *Symmetry*, 2023, vol. 15, iss. 5, art. 1037. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-8994/15/5/1037> (accessed 16.03.2026). <https://doi.org/10.3390/sym15051037>.
29. Li Z. A comparative study of Contrastive Self-Supervised Learning (CSSL): Methods, technologies, and applications. *Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research*, 2025, vol. 10, pp. 92–97. <https://doi.org/10.62051/2hgr2j26>.
30. Wang Y., Albrecht C. M., Zhu X. X. Multi-label guided supervised contrastive learning for earth observation pretraining. *2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Athens, Greece, 7–12 July 2024*. Athens, 2024, pp. 7568–7571. <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10642289>.
31. Howard A., Sandler M., Chen B., Wang W., Chen L.-C., Tan M. Searching for MobileNetV3. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 27 October – 02 November 2019*. Seoul, 2019, pp. 1314–1324. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00140>.
32. Perez E., Strub F., Vries H. de, Dumoulin V., Courville A. FiLM: Visual reasoning with a general conditioning layer. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, New Orleans, Louisiana, USA, 2–7 February 2018*. New Orleans, 2018, vol. 32, iss. 1, pp. 3942–3951. <https://doi.org/10.1609/aaai.v32i1.11823>.

Информация об авторах

Козлов Анатолий Анатольевич, аспирант кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования, Белорусский государственный университет.

E-mail: anatoly.kozlov.ak@yandex.ru

Абламейко Сергей Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Республики Беларусь, профессор кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования, Белорусский государственный университет.

E-mail: ablameyko@bsu.by

Information about the authors

Anatoly A. Kozlov, Postgraduate Student at the Department of Web Technologies and Computer Modeling, Belarusian State University.

E-mail: anatoly.kozlov.ak@yandex.ru

Sergey V. Ablameyko, Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the National Academy of Sciences of Belarus, Prof. at the Department of Web Technologies and Computer Modeling, Belarusian State University.

E-mail: ablameyko@bsu.by

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL MODELING

УДК 519.8; 621.3:007; 621.3:001.891.57
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-24-48>

Поступила в редакцию | Received 13.07.2026
Подписана в печать | Accepted 03.08.2026
Опубликована | Published 30.09.2026

Совместная оптимизация размещения разнородной зарядной инфраструктуры, маршрутизации разнотипных электробусов и расписаний зарядки

Н. Н. Гушинский, М. Я. Ковалев, Б. М. Розин✉

✉E-mail: rozin@newman.bas-net.by

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь*

Аннотация

Цели. При замене дизельных автобусов электробусами актуальной является задача выбора состава парка электробусов и назначения электробусам сервисных рейсов из заданного набора, зарядной инфраструктуры и расписаний зарядки. Цель исследования заключается в создании моделей и методов получения экономически эффективных решений этой задачи для разнотипных электробусов и зарядных станций при различных объемах пассажиропотока для разных рейсов.

Методы. Используются методы теории множеств, теории графов, исследования операций, математического программирования.

Результаты. Разработана математическая модель задачи оптимизации парка разнотипных электробусов, их маршрутизации, распределения по депо в начале и конце интервала планирования, определения мест и количества разнотипных зарядных станций на терминалах маршрутов и расписания зарядки. В качестве целевой функции выбраны общие дневные капитальные и операционные затраты на электробусы, зарядные станции и потребленную электроэнергию. Предложена двухуровневая декомпозиционная схема решения задачи, на верхнем уровне которой определяются дневные задания электробусов (назначение разнотипным электробусам последовательностей сервисных рейсов с различным объемом пассажиропотока), а на нижнем – распределение электробусов по депо, размещение зарядных станций на терминалах маршрутов и расписания зарядки электробусов при фиксированном назначении на рейсы. Для решения подзадачи верхнего уровня предложен эвристический алгоритм локального поиска, для подзадачи нижнего уровня разработана модель смешанного целочисленного линейного программирования.

Заключение. Решение подзадачи верхнего уровня заключается в выборе назначения электробусов различных типов на сервисные рейсы с разным объемом пассажиропотока. Для решения сформулированной подзадачи нижнего уровня можно использовать стандартные решатели, например Gurobi Optimizer.

Ключевые слова: электробус, аккумуляторная батарея, станция зарядки, оптимизация, смешанное целочисленное линейное программирование

Благодарности. Исследование выполнялось при частичной поддержке проекта БРФФИ № Ф26КИ-018 «Методы искусственного интеллекта при построении расписаний для современного производства, логистики и электротранспорта».

Для цитирования. Гушинский, Н. Н. Совместная оптимизация размещения разнородной зарядной инфраструктуры, маршрутизации разнотипных электробусов и расписаний зарядки / Н. Н. Гушинский, М. Я. Ковалев, Б. М. Розин // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 3. – С. 24–48. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-24-48>.

Конфликт интересов. М. Я. Ковалев является членом редакционной коллегии журнала «Информатика» с 2009 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Joint optimization of heterogeneous charging infrastructure location, heterogeneous electric bus routing and charging scheduling

Nikolai N. Guschinsky, Mikhail Y. Kovalyov, Boris M. Rozin✉

✉E-mail: rozin@newman.bas-net.by

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

Abstract

Objectives. When replacing diesel buses with electric buses, the problem of selecting the composition of the electric bus fleet, assigning service trips from a given set to electric buses, and determining charging infrastructure and charging schedules becomes relevant. The aim of the study is to create models and methods for obtaining cost-effective solutions to this problem for heterogeneous electric buses and charging stations under different passenger flow volumes for different trips.

Methods. Methods of set theory, graph theory, operations research, and mathematical programming are used.

Results. A mathematical model has been developed for the problem of optimizing a fleet of various-type electric buses, their routing, assignment to depots at the beginning and end of the planning interval, determination of the locations and number of charging stations of different types at route terminals, and charging schedules. The objective function is the total daily capital and operating costs of electric buses, charging stations, and consumed electricity. A two-level decomposition scheme for solving the problem is proposed, at the upper level of which daily assignments for electric buses are determined (assigning different types of electric buses to service trip sequences with varying passenger volumes). The lower level distributes electric buses among depots, locates charging stations at route terminals, and determines charging schedules for electric buses with fixed trip assignments. A heuristic local search algorithm is proposed for solving the upper-level subproblem, and a mixed integer linear programming model is developed for the lower-level subproblem.

Conclusion. The solution to the upper-level subproblem consists of assigning different types of electric buses to service trips with varying passenger volumes. Standard solvers, such as Gurobi Optimizer, can be used to solve the formulated lower-level subproblem.

Keywords: electric bus, battery, charging station, optimization, mixed integer linear programming

Acknowledgements. The research was carried out with partial support from the Project of BRFFR № Ф26КИ-018 "Artificial intelligence methods of scheduling for modern manufacturing, logistics, and electric transport".

For citation. Guschinsky N. N., Kovalyov M. Y., Rozin B. M. *Joint optimization of heterogeneous charging infrastructure location, heterogeneous electric bus routing and charging scheduling*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 3, pp. 24–48 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-24-48>.

Conflict of interests. M. Y. Kovalyov has been a member of the editorial board of the journal "Informatics" since 2009 but had no role in the decision to publish this article. The article has undergone the journal's established peer-review process. The authors declare of no other conflicts of interest.

Введение

В последние годы значительное внимание в литературе уделяется различным аспектам планирования парка и зарядной инфраструктуры для городского электротранспорта, в частности *электробусов* (далее ЭБ) [1–5]. Применяемые технологии зарядки ЭБ варьируются в широком диапазоне (URL: <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-report2017-2018-final.pdf>): в депо; на конечных остановках (терминалах) маршрутов; в депо и на конечных остановках; в депо, на конечных и промежуточных остановках. На практике чаще всего применяются технологии быстрой зарядки аккумуляторных батарей (далее *батарей*) ЭБ на терминалах маршрутов и медленной зарядки в депо, как правило, в ночной период [1]. Для зарядки на маршруте, включая терминалы, обычно требуются зарядные устройства большой мощности (до 400–500 кВт), в то время как для зарядки в депо могут использоваться зарядные устройства малой мощности (80–100 кВт) [2, 3]. Наиболее распространена в последнее время технология быстрой зарядки ЭБ на терминалах [4, 5].

При выборе парка ЭБ и их зарядной инфраструктуры требуется учитывать множество факторов, в том числе расписание сервисных рейсов с различными объемами пассажиропотока, расход электроэнергии в зависимости от типа ЭБ, маршрутов и особенностей эксплуатации (погодных условий и интенсивности трафика), размещение и скорость зарядки разнотипных *зарядных станций* (далее ЗС), стоимостные характеристики ЭБ и ЗС, тарифы на электроэнергию и т. д. Также по мере роста парка городских ЭБ возрастает нагрузка на энергосистему, что требует принятия решений по сглаживанию пиковых нагрузок.

ЭБ обычно отправляются в путь из депо и возвращаются в то же или другое депо в конце дня. Для восстановления затраченной электроэнергии используются технологии медленной зарядки в ночное время в депо и быстрой подзарядки в течение дня на терминалах маршрутов. После ночной зарядки в депо ЭБ на следующий день отправляются с полностью заряженными батареями. При подзарядке в течение дня уровень заряда батареи ЭБ может быть восстановлен частично на любой ЗС до уровня, достаточного для выполнения следующего рейса. Обычно предполагается, что ЭБ могут заряжаться в любом терминале. Для оптимизации расхода электроэнергии и уменьшения пиковых нагрузок на электросеть применяются зависящие от времени тарифы на электроэнергию.

Настоящее исследование посвящено решению комплексной задачи оптимального по стоимости выбора состава парка разнотипных ЭБ, распределения ЭБ по депо, назначения ЭБ на сервисные рейсы с различными объемами пассажиропотока, выбора терминалов для установки и количества устанавливаемых разнотипных ЗС, а также расписаний зарядки ЭБ на ЗС.

Предлагаемая модель охватывает следующие практически значимые ключевые компоненты задачи: разнотипные ЭБ, несколько депо ограниченной вместимости, различный пассажиропоток, разнотипные ЗС и зависящие от времени тарифы на электроэнергию.

Рассматриваемый подход к решению комплексной задачи заключается в двухуровневой декомпозиции исходной задачи на подзадачу нижнего уровня – выбора оптимального распределения ЭБ по депо, зарядной инфраструктуры терминалов и распи-

саний зарядки ЭБ при фиксированных последовательностях выполняемых каждым ЭБ сервисных рейсов и подзадачу верхнего уровня – выбора эффективного назначения ЭБ последовательностей сервисных рейсов.

1. Обзор литературы

Обзор охватывает следующие важные практические аспекты маршрутизации и зарядки ЭБ: выбор состава парка ЭБ, назначение ЭБ на сервисные рейсы в соответствии с заданным расписанием, выбор мест размещения и состава устанавливаемых ЗС, формирование расписания зарядки ЭБ на ЗС, распределение ЭБ по депо.

Ряд исследований посвящен комплексным задачам совместной оптимизации парка ЭБ, зарядной инфраструктуры, назначения ЭБ на сервисные рейсы и расписаний зарядки ЭБ.

В работе [6] для системы маршрутов с несколькими депо и многими терминалами исследуется задача совместной оптимизации диспетчеризации заданного набора рейсов для парка однородных ЭБ, расписаний их быстрой подзарядки между рейсами на идентичных ЗС терминалов и распределения ЭБ по различным депо. Учитываются зависящие от времени суток тарифы на электроэнергию, а также возможность управления скоростью зарядки: любой ЭБ может заряжаться на последовательности временных интервалов в промежутке между сервисными рейсами с различными кусочно-постоянными скоростями зарядки. Зарядка в депо не рассматривается. Сокращение количества используемых ЭБ может достигаться за счет дополнительных порожних (без пассажиров) рейсов между терминалами. В качестве цели выбрана минимизация общих капитальных и эксплуатационных затрат на ЭБ и ЗС, на порожние рейсы, потраченную электроэнергию и затрат на контрактную мощность сети для ЗС. В работе не учитываются ограниченность поставляемой энергосетью мощности для каждого места размещения зарядной инфраструктуры и предельное количество ЗС. Соответственно, возможная конкуренция ЭБ за ресурсы времени на ЗС не учитывается. Предложена формулировка *смешанного целочисленного линейного программирования* (СЦЛП) для этой задачи. Для подзадачи поиска мест размещения ЗС и назначения ЭБ на рейсы разработана процедура локального поиска.

В статье [7] рассматривается задача выбора расписания и назначения ЭБ на сервисные рейсы для системы маршрутов с многими терминалами, а также выбора мест установки ЗС с целью минимизации количества используемых идентичных ЭБ при выполнении ограничений, касающихся маршрутизации и зарядки. Заданное множество сервисных рейсов, как и в работе [6], разделено по маршрутным линиям, определяемым начальным и конечным терминалами, а также последовательностью промежуточных остановок. Каждый маршрут между терминалами характеризуется интервалом между рейсами и числом рейсов, каждый сервисный рейс характеризуется длительностью, расстоянием и затратами энергии. Интервал между соседними рейсами является параметром, который может принимать фиксированное значение либо выбираться из заданного диапазона значений. Предложена формулировка задачи в форме СЦЛП. В этой формулировке имеется ограничение на количество устанавливаемых в терминале ЗС, но при этом не учитывается полностью возможность конкуренции ЭБ за ресурсы времени на ЗС.

В работе [8] исследована задача определения парка разнотипных ЭБ для выполнения заданного набора сервисных рейсов и количества однотипных зарядных устройств для подзарядки ЭБ, размещаемых в одном депо, для стратегии полной зарядки ЭБ при каждом посещении депо и неизменных тарифах на электроэнергию. Был предложен генетический алгоритм в сочетании с моделью смешанного целочисленного нелинейного программирования. В работе [9] авторы исследовали задачу маршрутизации однотипных ЭБ для заданного набора рейсов с выбором одинаковых зарядных устройств для установки на терминалах. Приведены две формулировки этой задачи оптимизации. Первая основана на теории функции дефицита, а вторая представляет собой двухкритериальную модель целочисленного линейного программирования.

В исследовании [10] предложена модель задачи совместной оптимизации назначения на рейсы и зарядки разнотипного парка ЭБ в городских транспортных системах, совмещающая определение состава парка, планирование рейсов и зарядной инфраструктуры депо из однотипных зарядных устройств. Допускаются ограниченная задержка отправления в рейсы и управление скоростью движения ЭБ для соблюдения расписания прибытия на конечные терминалы. Расписание зарядки ЭБ на ЗС выбирается в условиях переменных тарифов на электроэнергию. Задача решается с использованием комбинации генетического алгоритма и метода роя частиц с ограничениями.

В работе [11] исследуется задача маршрутизации городских разнотипных ЭБ на основе заданного расписания рейсов с различными объемами пассажиропотока нескольких типов. Для повышения эффективности использования ЭБ различных типов предлагается методология принятия решений, позволяющая назначать разнотипные рейсы из заданного расписания ЭБ допустимого типа с учетом потребности в подзарядке и возможности замены ЭБ электробусом большей вместимости. Предложена оптимизационная модель в форме СЦЛП выбора ЭБ различных типов для минимизации годовых общих затрат, включающих затраты на покупку ЭБ, на покупку и установку однородных зарядных устройств, расходы на подзарядку ЭБ, а также эксплуатационные расходы на сервисные и порожние рейсы. Разработана эвристическая процедура на основе генетического алгоритма в сочетании с алгоритмом получения допустимых расписаний ЭБ в качестве функции пригодности. Процедура рассматривает возможность включения в расписание ЭБ поездок для подзарядки в ближайшее депо и замены ЭБ допустимого типа. Процедура протестирована на реальном примере транспортной сети района Дасин г. Пекина.

В исследовании [12] предлагается комплексная оптимизационная модель для формирования парка разнотипных ЭБ, выбора зарядной инфраструктуры на базе разнородных ЗС и расписания зарядки. В модели учитываются факторы, имеющие практическую значимость, включая стратегию частичной зарядки, непрерывность процесса зарядки, зависимость тарифов на электроэнергию от времени суток и совместимость транспортных средств с зарядными устройствами. Формулируется модель смешанного целочисленного программирования для минимизации общих затрат электротранспортной системы, включая затраты на зарядные устройства, ЭБ и электроэнергию. Разработан алгоритм генерации столбцов для решения задачи, и выполнено экспериментальное исследование на примере реальной транспортной сети в Нанкине, Китай.

В статье [13] рассматривается модель задачи совместной оптимизации назначения на рейсы и зарядки однородных ЭБ в городских транспортных системах, совмещающая определение состава парка ЭБ, планирование рейсов и зарядной инфраструктуры терминалов из однотипных зарядных устройств, а также расписание зарядки на терминалах ЭБ в дневное время при неизменных дневных тарифах на электроэнергию.

В ряде исследований, например [6], отмечается высокая вычислительная трудоемкость решения таких комплексных задач. Поэтому многие авторы, чтобы иметь возможность получать приемлемое по качеству решение в условиях ограниченных ресурсов времени и вычислительных мощностей, рассматривают решение отдельных компонентов задачи либо их комбинаций.

Анализ известных результатов для комплексных моделей оптимального планирования электротранспорта, включающих выбор смешанного парка ЭБ, зарядной инфраструктуры разнотипных зарядных устройств и расписаний зарядки, выявил недостаток внимания к необходимости сокращения количества используемых ЗС в условиях ограниченной пропускной способности зарядной инфраструктуры и конкуренции ЭБ за ресурс времени зарядки. Отчасти это связано с существенной дополнительной сложностью задачи вследствие необходимости учета ограничений на отсутствие пересечения событий зарядки различных ЭБ на одной ЗС.

Система ограничений оптимизационной модели, предложенной в настоящем исследовании, учитывает ограниченность пропускной способности зарядной инфраструктуры и исключает возможность пересечения событий зарядки различных ЭБ на одной ЗС. Таким образом, предложенная модель свободна от недостатков описанных выше моделей.

2. Постановка задачи

Рассматривается множество I сервисных рейсов, выполняемых в рамках периодически повторяющегося дневного интервала $[\underline{\Gamma}, \bar{\Gamma}]$, для городских маршрутов, характеризующихся начальным и конечным терминалами, а также последовательностью промежуточных остановок. Каждому маршруту между двумя заданными терминалами могут соответствовать несколько сервисных рейсов ЭБ, отличающихся моментами времени отправления и прибытия. Парк ЭБ $V = \bigcup_{m=1}^{\bar{m}} V_m$ составляют ЭБ $v \in V_m$ типа $m = m(v)$, $m \in BT = \{1, 2, \dots, \bar{m}\}$, характеризующиеся пассажироместимостью U_m (меньшему номеру типа соответствует большая вместимость), емкостью E_m (кВт·ч) батареи, диапазоном хода без подзарядки и общими суточными капитальными и эксплуатационными затратами c_m^{bus} . Множество I сервисных рейсов состоит из подмножеств I_m рейсов ($I = \bigcup_{m=1}^{\bar{m}} I_m$) с объемом пассажиропотока, допускающим обслуживание ЭБ типов $m' \leq m$, $m' \in BT$. При этом для любого рейса $i \in I$ существует хотя бы один тип ЭБ из V , способный его выполнить.

Для каждого сервисного рейса $i \in I$ заданы его тип $\pi(i)$ (максимальный номер типа ЭБ допустимой вместимости), стартовый a_i и конечный b_i терминалы, моменты времени α_i начала и β_i окончания рейса. В дальнейшем (если не определено иное) моменты времени и длительности измеряются в часах (ч). Для допустимого типа ЭБ $m = m(i)$ должно выполняться условие $1 \leq m \leq \pi(i)$. Для любой допустимой пары (сервисный рейс, тип ЭБ) $= (i, m)$ задана величина $g_{i,m}$ расхода *относительного заряда* батареи (далее *заряд*) ЭБ типа $m \in BT$, измеряемого в долях ее энергетической емкости, в сервисном рейсе $i \in I$. Аналогично для любой допустимой тройки (i, j, m) задана величина $g_{i,j,m}$ расхода

заряда ЭБ типа m в порожнем (без пассажиров) рейсе из терминала b_i в терминал a_j , $i, j \in I$. Первый рейс ЭБ типа m из депо $d \in D$ в стартовый терминал a_i сервисного рейса $i \in I$, как и последний рейс из конечного терминала b_j последнего сервисного рейса $j \in I$ в депо $d' \in D$, являются порожними и характеризуются длительностями $\gamma_{d,i}$, $\gamma_{j,d'}$ и величинами $g_{d,i,m}$, $g_{j,d',m}$ расхода заряда ЭБ типа m соответственно.

Допускаются переключения ЭБ с обслуживания одного маршрута на другой, т. е. ЭБ может обслуживать допустимые по вместимости запланированные рейсы по нескольким маршрутам. Сервисные рейсы (i, j) , $i, j \in I$, совместимы (могут быть выполнены одним ЭБ), если при $a_j = b_i$ (стартовый терминал рейса j является конечным терминалом рейса i) выполняется $\beta_i \leq \alpha_j$ и при $a_j \neq b_i$ выполняется $\beta_i + \gamma_{i,j} \leq \alpha_j$, где $\gamma_{i,j}$ – длительность порожнего рейса независимо от типа ЭБ. На любом из терминалов b_i либо a_j (при $a_j \neq b_i$) либо на обоих этих терминалах ЭБ, выполняющий рейсы i, j , может восстанавливать потраченный заряд батареи, если на соответствующем терминале установлены ЗС и интервал пребывания ЭБ на терминале позволяет выполнить операцию зарядки. Уровень заряда в процессе функционирования ЭБ типа m должен оставаться в рамках допустимого диапазона $[u_m^{\min}, u_m^{\max}]$, где $0 < u_m^{\min}$, $u_m^{\max}$ – уровень заряда полностью заряженной батареи, $u_m^{\max} \leq 1$. Любой терминал $\theta \in \Theta = \{a_i, b_i \mid i \in I\}$ может быть укомплектован ЗС различных типов $\rho \in CT$, характеризующихся величиной P_ρ (кВт) номинальной мощности и общими суточными капитальными и эксплуатационными затратами c_ρ^{ch} . Таким образом, терминал θ может комплектоваться ЗС из набора $C_\theta = \bigcup_{\rho \in CT} C_\theta^{(\rho)}$ с предельным общим количеством $|C_\theta|$ в зависимости от $\theta \in \Theta$.

Любой ЭБ может заряжаться при каждом посещении любого терминала не более одного раза и не более чем на одной ЗС. В каждый момент времени на одной ЗС может заряжаться не более одного ЭБ. Каждой операции зарядки ЭБ предшествует операция настройки ЗС и ЭБ длительности Δ , во время которой зарядка или настройка другого ЭБ не происходят. Длительность любой операции зарядки должна быть не меньше минимальной величины $tc_{\min}$.

Будем говорить, что каждому из терминалов b_i и a_j (при $a_j \neq b_i$) и ЭБ, последовательно выполняющему рейсы i, j , соответствует *опция зарядки*. Опция называется *непустой*, если временной интервал пребывания ЭБ в терминале позволяет выполнить зарядку, иначе она называется *пустой*. Если ЭБ посещает два терминала b_i , a_j при $a_j \neq b_i$, то возможны следующие комбинации опций зарядки: а) пустые опции в обоих терминалах при выполнении $\beta_i + \gamma_{i,j} + \Delta + tc_{\min} > \alpha_j$; б) одна пустая в одном из терминалов (b_i или a_j) и непустая в другом терминале при $\beta_i + \gamma_{i,j} + \Delta + tc_{\min} \leq \alpha_j < \beta_i + \gamma_{i,j} + 2(\Delta + tc_{\min})$; в) обе непустые опции в обоих терминалах (b_i и a_j) при $\beta_i + \gamma_{i,j} + 2(\Delta + tc_{\min}) \leq \alpha_j$. Если же ЭБ посещает один терминал между i и j , т. е. $b_i = a_j$, то этому терминалу соответствует комбинация опций, состоящая из единственной непустой опции при $\beta_i + \Delta + tc_{\min} \leq \alpha_j$ либо пустой при $\beta_i + \Delta + tc_{\min} > \alpha_j$. Реализацию опции зарядки будем называть событием зарядки. Реализация непустой опции зарядки в терминале зависит от выбираемого решения, включающего размещение ЗС в этом терминале, и от выполнения условия превышения длительности события зарядки минимальной величины $tc_{\min}$.

Первоначально каждый ЭБ $v \in V_m$, $m \in BT$, размещается в депо из заданного множества $D = \{d_1, d_2, \dots, \bar{d}\}$, в котором он восстанавливает заряд батареи ночью до максимального уровня $u_m^{\max}$. Процесс зарядки ЭБ в депо не рассматривается. В течение суток он

посещает депо однократно. ЭБ не обязан возвращаться в свое отправное депо в конце дня. Однако, поскольку дневные расписания обслуживания сервисных рейсов являются периодическими, требуется, чтобы начальное и конечное распределения количеств ЭБ каждого типа по депо совпадали. При этом должны учитываться предельные емкости $Ub_{d,m}$ каждого депо $d \in D$ для ЭБ типа $m \in BT$. Будем считать, что любому ЭБ, выполняющему порожний рейс (d, i) и (или) (j, d') из депо d в стартовый терминал a_i либо из конечного терминала b_j в депо d' , $i, j \in I$, $d, d' \in D$, соответствует по одной непустой опции зарядки в терминалах a_i и b_j . Это означает, что времени пребывания ЭБ в стартовом и конечном терминалах (при нефиксированных моментах времени выхода (возвращения) в депо) достаточно для восстановления заряда, потраченного в порожнем рейсе из депо либо в последнем сервисном рейсе перед возвращением в депо, до максимального уровня на ЗС любого типа.

Определим взаимно однозначное отображение z некоторого подмножества ЭБ парка V в некоторый набор $\Omega(z)$ непересекающихся последовательностей совместимых сервисных рейсов, дневных заданий ЭБ, образующих в совокупности все рейсы из I . Это отображение определяет множества ЭБ $V_m(z) = \{v_1, v_2, \dots, v_{\eta_m(z)}\}$, $m=1, 2, \dots, \bar{m}$, каждого типа, где $\eta_m(z)$ – количество используемых ЭБ типа m , и назначает каждому ЭБ $v \in V_m(z)$ последовательность сервисных рейсов $\omega_v(z) = (j_{v,1}, j_{v,2}, \dots, j_{v,\bar{l}_v})$, такую, что $\beta_{j_{v,l}} + \gamma_{j_{v,l}, j_{v,l+1}} \leq \alpha_{j_{v,l+1}}$, $l=1, 2, \dots, \bar{l}_v - 1$, $j_{v,l} \in \bigcup_{\xi=m}^{\bar{m}} I_\xi$, $\omega_v(z) \cap \omega_{v'}(z) = \emptyset$ для $v \neq v'$, $v, v' \in V(z)$ и $\bigcup_{m=1, v \in V_m(z)}^{\bar{m}} \omega_v(z) = I$. Набор $\Omega(z) = \{\omega_v(z) | v \in V\}$ непересекающихся заданий, включающих в совокупности все рейсы из I , будем называть *назначением* z ЭБ парка $v \in V$, $z \in Z$. Отметим, что $\eta_m(z)$ равно количеству заданий, выполняемых ЭБ из $V_m(z)$, $m \in BT$. Пусть Z – множество всех таких назначений.

Задание $\omega_v(z)$ однозначно определяет для каждой пары (i, j) , $i, j \in \omega_v(z)$, смежных сервисных рейсов наличие порожнего рейса (при $a_j \neq b_i$) либо его отсутствие (при $a_j = b_i$) и тип $tp_{i,j} \in \{0, 1, 2, 3\}$ комбинации опций зарядки на обоих терминалах в промежутке между рейсами, где 0 – пустые опции – одна при $a_j = b_i$ либо две при $a_j \neq b_i$, если $\alpha_j < \beta_i + \gamma_{i,j} + \Delta + tc_{\min}$, 1 – одна непустая опция при $b_i = a_j$, если $\beta_i + \Delta + tc_{\min} \leq \alpha_j$, 2 – две непустые опции при $b_i \neq a_j$, если $\beta_i + \gamma_{i,j} + 2(\Delta + tc_{\min}) \leq \alpha_j$, 3 – одна непустая (либо в b_i , либо в a_j) и другая пустая опции при $b_i \neq a_j$, если $\Delta + tc_{\min} \leq \alpha_j - \beta_i - \gamma_{i,j} < 2(\Delta + tc_{\min})$. Напомним, что первый рейс задания $\omega_v(z)$ является порожним из некоторого стартового депо $d_v^s \in D$, а последний рейс – также порожний в некоторое финишное депо $d_v^f \in D$. Как было сказано выше, стартовому терминалу $a_{j_{v,1}}$ первого рейса $j_{v,1}$ задания $\omega_v(z)$ соответствует непустая опция зарядки ($tp_{d_v^s, j_{v,1}} = 1$) и конечному терминалу $b_{j_{v,\bar{l}_v}}$ последнего рейса $j_{v,\bar{l}_v}$ также соответствует непустая опция зарядки ($tp_{j_{v,\bar{l}_v}, d_v^f} = 1$).

Обозначим $Q_\theta(z)$ множество всех опций зарядки (включая пустые) всех ЭБ $v \in V(z)$ в течение дня на терминале $\theta \in \Theta$ при фиксированном z . Восстановление уровня заряда для пары (m, ρ) (предполагая, что любые пары (m, ρ) совместимы) на любой ЗС $c \in C_\theta^{(\rho)}$ типа ρ в допустимом диапазоне $[u_m^{\min}, u_m^{\max}]$ осуществляется на постоянной мощности $P_\rho = E_m \cdot f_{m,\rho}$ (кВт) со скоростью $f_{m,\rho}$ единиц заряда в час. Таким образом, максималь-

ная длительность зарядки батареи любого ЭБ типа m на ЗС типа ρ составляет

$$\tau_{m,\rho}^{\max} = \frac{u_m^{\max} - u_m^{\min}}{f_{m,\rho}}, \quad m \in BT, \rho \in CT. \text{ Положим } Q(z) = \bigcup_{\theta \in \Theta} Q_\theta(z).$$

Сопоставим каждой опции зарядки из множества $Q(z)$ всех опций индекс q , однозначно определяющий используемый ЭБ $v(q)$, его тип $m(q)$, назначенное ему задание $\omega_{v(q)}(z)$ сервисных рейсов, терминал $\theta(q)$ выполнения этой опции и допустимый диапазон $[A_q, B_q]$ моментов начала и завершения зарядки, которые определяются далее в разд. 3.1 на основе входных данных и фиксированного назначения z .

Рассматриваемый периодически повторяющийся дневной период $[\underline{\Gamma}, \bar{\Gamma}]$ работы транспорта разбивается на подынтервалы $T_p = [\underline{T}_p, \bar{T}_p]$, $p = 1, \dots, \bar{p}$, $\underline{T}_1 = \underline{\Gamma}$, $\bar{T}_{\bar{p}} = \bar{\Gamma}$, характеризующиеся постоянными тарифами c_p^e на электроэнергию. Предполагается, что все сервисные рейсы и соответствующие события зарядки ЭБ выполняются в рамках заданного диапазона $[\underline{\Gamma}, \bar{\Gamma}]$. Достаточное для этого условие $0 \leq \underline{\Gamma} \leq \alpha_j - \Delta - \tau_{m,\rho}^{\max} < \alpha_j < \beta_j < \beta_j + \Delta + \tau_{m,\rho}^{\max} \leq \bar{\Gamma} \leq 24$, $j \in I$, $m = 1, 2, \dots, \bar{m}$, $\rho \in CT$, считаем выполненным.

Также для уменьшения комбинаторной сложности и в соответствии с реальностью считаем, что длина любого подынтервала T_p больше максимальной длительности любой зарядки. Из этого следует, что при любой зарядке действует один либо два последовательных тарифа на электроэнергию.

Рассматривается *представительный день* года (для Европы, как правило, рабочий день февраля), характеризующий наибольшим расходом ЭБ электроэнергии вследствие неблагоприятных погодных условий и дорожной обстановки. Пропускная способность зарядной инфраструктуры, обеспечивающая функционирование парка ЭБ для такого дня, позволяет обеспечить его функционирование для любого дня года.

Рассматриваемая задача заключается в определении подмножеств используемых разнотипных ЭБ, назначении выбранным ЭБ допустимых последовательностей сервисных рейсов, выборе депо для размещения ЭБ, выборе терминалов для размещения ЗС и количества размещаемых на каждом из них ЗС каждого типа, а также расписаний зарядки ЭБ, минимизирующих суточные капитальные и операционные затраты на ЭБ, ЗС и потребленную электроэнергию в периоде $[\underline{\Gamma}, \bar{\Gamma}]$. Назначенные последовательности сервисных рейсов должны обеспечивать выполнение всех запланированных в периоде $[\underline{\Gamma}, \bar{\Gamma}]$ сервисных рейсов допустимыми по вместимости ЭБ. Размещение ЗС на терминалах должно обеспечивать возможность восстановления уровня заряда ЭБ для выполнения назначенных им рейсов, а расписания их зарядки должны учитывать приведенные выше условия и ограничения по времени и уровню заряда при приходе и выходе из терминалов, а также совместимость выполнения операций зарядки на каждой ЗС. Кроме того, для сглаживания нежелательных пиковых нагрузок мощности на городскую энергосеть дополнительно накладываются ограничения на количество размещаемых в отдельных терминалах ЗС, что влечет необходимость перераспределения операций зарядки части ЭБ во времени и пространстве.

С точки зрения теории сложности вычислений рассматриваемая задача является NP-трудной в сильном смысле, поскольку к ней сводятся некоторые классические NP-полные в сильном смысле задачи [14]. Например, NP-полная в сильном смысле задача о существовании гамильтонова цикла в произвольном ориентированном графе

эквивалентна задаче существования одной допустимой последовательности всех сервисных рейсов (выполняемых одним ЭБ), в которой сервисный рейс соответствует вершине произвольного ориентированного графа и возможность или невозможность выполнения двух сервисных рейсов непосредственно друг за другом эквивалентны наличию или отсутствию дуги в графе между соответствующими вершинами. Другим примером является NP-полная в сильном смысле задача «многопроцессорное расписание», которая эквивалентна задаче существования допустимого расписания зарядки n ЭБ m параллельными ЗС в заданном интервале времени. Из NP-трудности задачи следует, что отыскание оптимального решения ее примеров большой размерности за приемлемое время, скорее всего, невозможно и необходимо сосредоточиться на построении практически приемлемых эвристических решений.

3. Декомпозиционная схема решения задачи

Предлагается следующая двухуровневая декомпозиционная схема решения задачи. В подзадаче нижнего уровня предполагается, что используемые ЭБ и назначенные им допустимые последовательности сервисных рейсов заданы и требуется определить стартовые и финишные депо для ЭБ, разместить ЗС на терминалах и определить расписания зарядки ЭБ таким образом, чтобы минимизировать общие дневные затраты на ЗС и потребленную электроэнергию.

На верхнем уровне решается подзадача отыскания назначения $z \in Z$, т. е. выбора ЭБ и назначения им допустимых последовательностей сервисных рейсов. При этом должны обеспечиваться достаточные интервалы пребывания ЭБ на терминалах для восстановления их уровня заряда в промежутках между рейсами. Возможная конкуренция за ресурсы ЗС не учитывается. Целью является минимизация функции $\Psi(z) = \sum_{m \in BT} c_m^{bus} \eta_m(z) + \Phi^*(z)$, включающей оптимальное значение $\Phi^*(z)$ целевой функции подзадачи нижнего уровня для назначения z и суточные капитальные и операционные затраты $\sum_{m \in BT} c_m^{bus} \eta_m(z)$ на ЭБ парка.

Для решения подзадачи нижнего уровня предлагается оригинальная модель СЦЛП, описание которой приводится в подразд. 3.1. Для решения подзадачи верхнего уровня используется эвристический алгоритм, описываемый в подразд. 3.2.

3.1. Подзадача нижнего уровня

Описывается модель СЦЛП выбора терминалов размещения и количества размещаемых ЗС каждого типа, расписания зарядки ЭБ и распределения ЭБ по депо при фиксированном назначении заданий ЭБ. Заметим, что любому рейсу $i \in I$ соответствуют его тип $\pi(i)$ и ЭБ $v(i) \in V$ типа $m(i) := m(v(i))$. При этом тип $m(i)$ ЭБ, выполняющего рейс i , удовлетворяет условиям $1 \leq m(i) \leq \pi(i)$.

Далее назначение z считается фиксированным и для краткости опущено. На основании входных данных определяются следующие дополнительные параметры:

I_θ^- – множество рейсов $i \in I$, таких, что $a_i = \theta$;

I_θ^+ – множество рейсов $i \in I$, таких, что $b_i = \theta$;

Q_i^- – множество опций зарядки в терминале $\theta = a_i$ после порожнего рейса из депо d для всех пар (d, a_i) , $d \in D$, $i \in I$;

Q_i^+ – множество опций зарядки в терминале $\theta=b_i$ перед порожним рейсом в депо d для всех пар (b_i, d) , $d \in D$, $i \in I$;

$Q_{i,j,\theta}$ – множество опций зарядки в $\theta \in \{b_i, a_j\}$ между рейсами $i, j \in I$;

$q(\theta_{j_v,l})$ – индекс опции зарядки ЭБ v в терминале $\theta_{j_v,l} \in \{a_{j_v,l}, b_{j_v,l}\}$ задания $\omega_v = (j_{v,1}, j_{v,2}, \dots, j_{v,\bar{l}_v})$ для $l=1, 2, \dots, \bar{l}_v$, $v \in V$;

Q_θ – множество опций зарядки в $\theta \in \Theta$, $Q_\theta = \bigcup_{i \in I_\theta^-} Q_i^- \cup \bigcup_{i \in I_\theta^+} Q_i^+ \cup \bigcup_{i,j \in I} Q_{i,j,\theta}$;

Q – множество опций зарядки во всех терминалах, $Q = \bigcup_{\theta \in \Theta} Q_\theta$;

$Q_\theta^{(p)}$ – множество опций зарядки в терминале θ , таких, что $[A_q, B_q] \subseteq T_p$, $p \in \{1, \dots, \bar{p}\}$;

$Q_\theta^{(p,+)}$ – множество опций зарядки в терминале θ , таких, что $\bar{T}_p \in [A_q, B_q]$, при выполнении зарядки в которых могут применяться два различных тарифа c_p^e и c_{p+1}^e , $p \in \{1, \dots, \bar{p}-1\}$;

$\bar{Q}_\theta = \bigcup_{p=1}^{\bar{p}-1} Q_\theta^{(p,+)}$ – множество опций зарядки в терминале θ , при выполнении которых могут применяться два различных тарифа;

$Q_\theta \setminus \bar{Q}_\theta$ – множество опций зарядки в терминале θ , при выполнении которых применяется единственный тариф.

Допустимые диапазоны моментов начала и завершения зарядки для опций $q \in Q$:

$[A_q, B_q] = [\alpha_i - \Delta - \max\{\tau_{m,p}^{\max} \mid m \in BT, p \in CT\}, \alpha_i]$, $q \in Q_i^-$, $i \in I_\theta^-$, $d \in D$;

$[A_q, B_q] = [\beta_i, \beta_i + \Delta + \max\{\tau_{m,p}^{\max} \mid m \in BT, p \in CT\}]$, $q \in Q_i^+$, $i \in I_\theta^+$, $d \in D$;

$[A_q, B_q] = [0, 0]$, если $q \in Q \setminus (Q_i^- \cup Q_i^+)$, $tp_{i,j}=0$, $i, j \in I$;

$[A_q, B_q] = [\beta_i, \alpha_j]$, если $q \in Q \setminus (Q_i^- \cup Q_i^+)$, $tp_{i,j}=1$, $i, j \in I$;

$[A_q, B_q] = [\beta_i, \alpha_j - \gamma_{i,j}]$, если $q \in Q_{i,j,b_i}$, $tp_{i,j} \in \{2, 3\}$, $i, j \in I$;

$[A_q, B_q] = [\beta_i + \gamma_{i,j}, \alpha_j]$, если $q \in Q_{i,j,a_j}$, $tp_{i,j} \in \{2, 3\}$, $i, j \in I$.

Управляемые переменные

$S_{c,q}$ – момент начала события зарядки q на ЗС $c \in C_\theta$ (для пустой опции $S_{c,q}=0$);

$F_{c,q}$ – момент завершения события зарядки q на ЗС $c \in C_\theta$ (для пустой опции $F_{c,q}=0$);

$t_{c,q}^{(p)}$ – длительность события зарядки q на ЗС $c \in C_\theta$ (для пустой опции $t_{c,q}^{(p)}=0$);

$y_{c,q}^{(p)} \in \{0, 1\}$ – принимает значение 1 тогда и только тогда, когда $t_{c,q}^{(p)} > 0$ (для пустой опции $y_{c,q}^{(p)}=0$);

$\tau_q^{(p)}$ – длительность события зарядки q на ЗС $c \in C_\theta^{(p)}$ (для пустой опции $\tau_q^{(p)}=0$);

$y_q^{(p)} \in \{0, 1\}$ – принимает значение 1 тогда и только тогда, когда $\tau_q^{(p)} > 0$ (для пустой опции $y_q^{(p)}=0$);

$\sigma_{\theta,c}^{(p)} \in \{0, 1\}$ – принимает значение 1 тогда и только тогда, когда происходит событие зарядки на ЗС $c \in C_\theta^{(p)}$ терминала θ ($\sigma_{\theta,c}^{(p)}=0$, если ЗС $c \in C_\theta^{(p)}$ соответствуют только пустые опции);

$\mu_\theta^{(p)}$ – количество используемых ЗС $c \in C_\theta^{(p)}$ терминала θ ;

u_i^1 – уровень заряда ЭБ $v(i)$ после прибытия в терминал a_i рейса $i \in I$;

u_i^2 – уровень заряда ЭБ $v(i)$ после возможной зарядки в терминале a_i рейса $i \in I$;
 u_i^3 – уровень заряда ЭБ $v(i)$ после прибытия в терминал b_i рейса $i \in I$;
 u_i^4 – уровень заряда ЭБ $v(i)$ после возможной зарядки в терминале b_i рейса $i \in I$;
 $x_d^{(s)}(i) \in \{0,1\}$ – принимает значение 1 тогда и только тогда, когда рейс $i \in I$ является первым для ЭБ $v(i)$ типа $m(i)$ и порожний рейс в a_i выполняется из депо d , иначе 0;
 $x_d^{(e)}(i) \in \{0,1\}$ – принимает значение 1 тогда и только тогда, когда рейс $i \in I$ является последним для ЭБ $v(i)$ типа $m(i)$ и порожний рейс из b_i выполняется в депо d , иначе 0.

Определим кусочно-линейные функции $\tilde{C}_p^{(p)}(t)$ кумулятивной стоимости зарядки от момента завершения t зарядки для любых опций $q \in Q_0^{(p,+)}$, $p \in CT$, $p=1, \dots, \bar{p}-1$:

$$\tilde{C}_p^{(p)}(t) = 0 \text{ для } 0 \leq t \leq A_q;$$

$$\tilde{C}_p^{(p)}(t) = c_p^e P_p t \text{ для } A_q \leq t \leq \bar{T}_p;$$

$$\tilde{C}_p^{(p)}(t) = c_p^e P_p A_q + c_{p+1}^e P_p t \text{ для } \bar{T}_p \leq t \leq B_q.$$

Для использования функции $\tilde{C}_p^{(p)}(t)$ в модели СЦПП введем дополнительные переменные: $w_{q,1}^{(p)} = \{1, \text{ если } y_q^{(p)} = 1 \text{ и } A_q \leq t \leq \bar{T}_p, 0 - \text{ иначе}\}$, $w_{q,2}^{(p)} = \{1, \text{ если } y_q^{(p)} = 1 \text{ и } \bar{T}_p \leq t \leq B_q, 0 - \text{ иначе}\}$ и условие $(1 - y_q^{(p)}) + w_{q,1}^{(p)} + w_{q,2}^{(p)} = 1$.

Отметим, что $1 - y_q^{(p)} = 0$ при $0 \leq t \leq A_q$. (Соответствующие условия для системы ограничений оптимизационной задачи СЦПП формируются стандартными средствами пакетов СЦПП.)

Обозначим через $\mu(z)$, $\tau(z)$, $t(z)$, $y(z)$, $S(z)$, $F(z)$, $u(z)$, $x(z)$ векторы значений переменных μ , τ , t , y , S , F , u , x при фиксированном наборе z последовательностей сервисных рейсов, $z \in Z$.

Подзадача нижнего уровня заключается в отыскании векторов $\mu(z)$ количеств ЗС каждого типа в терминалах $\theta \in \Theta$; длительностей $\tau(z)$, $t(z)$ зарядки всех ЭБ $v \in V(z)$ для всех их опций q зарядки в соответствующих терминалах $\theta(q)$, моментов $S(z)$, $F(z)$ старта и завершения этих событий зарядки, уровней $u(z)$ заряда каждого ЭБ перед посещением терминала и после каждой опции зарядки, а также значений $x(z)$ булевых переменных $x_d^{(s)}(i)$ (либо $x_d^{(e)}(i)$), определяющих рейс i для некоторого ЭБ $v(i) \in V(z)$ как первый сервисный с предшествующим порожним рейсом из стартового депо $d_{v(i)}^s$ (либо соответственно как последний сервисный с последующим порожним рейсом в финишное депо $d_{v(i)}^f$). Целью является минимизация функции $\Phi(\mu(z), \tau(z), t(z), y(z), S(z), F(z), u(z), x(z))$ при выполнении системы ограничений. Целевая функция и ограничения подзадачи описаны ниже.

Целевая функция подзадачи нижнего уровня

Целевая функция (1) представляет общие суточные затраты на ЗС и потраченную электроэнергию при фиксированном z . Суточные инвестиционные и операционные затраты на ЗС всех типов определяются суммой произведений суточных затрат c_p^{ch} , $p \in CT$, на одну ЗС каждого типа p и количеств $\mu_\theta^{(p)}(z)$ ЗС этого типа для каждого из терминалов $\theta \in \Theta$. Суточные затраты на электроэнергию ЭБ выражаются суммой произведений тарифов c_p^e на величины электроэнергии, потребленной ЭБ $v \in V(z)$ для событий зарядки из

множеств $Q_\theta \setminus \bar{Q}_\theta$, выполняющихся на ЗС $\rho \in CT$ при постоянных тарифах в пределах диапазонов T_p , $p=1, \dots, \bar{p}$, $\theta \in \Theta$, а также суммой разностей между значениями кусочно-линейных функций $\tilde{C}_p^{(\rho)}(\cdot)$ кумулятивной стоимости энергии в конце и начале зарядки для событий зарядки из множеств $\bar{Q}_\theta$, «окна» зарядки которых принадлежат двум интервалам $p, p+1$ с различными тарифами, $p=1, \dots, \bar{p}-1$, $\theta \in \Theta$:

$$\min \Phi(\mu(z), \tau(z), t(z), y(z), S(z), F(z), u(z), x(z)) = \\ = \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{\rho \in CT} c_p^{ch} \mu_\theta^{(\rho)}(z) + \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{\rho \in CT} \left[\sum_{q \in Q_\theta(z) \setminus \bar{Q}_\theta(z)} \sum_{p=1}^{\bar{p}} c_p^e P_\rho \cdot \tau_q^{(\rho)}(z) + \sum_{q \in Q_\theta(z)} \sum_{p=1}^{\bar{p}-1} \sum_{c \in C_\theta^{(\rho)}} (\tilde{C}_p^{(\rho)}(F_{c,q}) - \tilde{C}_p^{(\rho)}(S_{c,q})) \right]. \quad (1)$$

В дальнейшем назначение z считается фиксированным и опущено для краткости изложения.

Ограничения подзадачи нижнего уровня

Условия для разнотипных ЗС терминалов определяются ограничениями

$$\mu_\theta^{(\rho)} = \sum_{c \in C_\theta^{(\rho)}} \sigma_{\theta,c}^{(\rho)}, \quad \rho \in CT, \quad \theta \in \Theta, \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta,c}^{(\rho)} \leq \sum_{q \in Q_\theta} y_{c,q}^{(\rho)}, \quad c \in C_\theta^{(\rho)}, \quad \rho \in CT, \quad \theta \in \Theta, \quad (3)$$

$$0 \leq |Q_\theta| \cdot \sigma_{\theta,c}^{(\rho)} - \sum_{q \in Q_\theta} y_{c,q}^{(\rho)}, \quad c \in C_\theta^{(\rho)}, \quad \rho \in CT, \quad \theta \in \Theta, \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta,c+1}^{(\rho)} \leq \sigma_{\theta,c}^{(\rho)}, \quad c, c+1 \in C_\theta^{(\rho)}, \quad \rho \in CT, \quad \theta \in \Theta, \quad (5)$$

$$\sum_{\rho \in CT} \mu_\theta^{(\rho)} \leq |C_\theta|, \quad \theta \in \Theta, \quad (6)$$

$$\sum_{\rho \in CT} \sum_{c \in C_\theta^{(\rho)}} y_{c,q}^{(\rho)} \leq 1, \quad q \in Q_\theta, \quad \theta \in \Theta. \quad (7)$$

Условия (2)–(7) обеспечивают равенство значения параметра $\mu_\theta^{(\rho)}$ числу используемых ЗС типа ρ терминала θ и исключают наличие неиспользуемых ЗС каждого типа. Ограничения (3), (4) обеспечивают значение булевой переменной $\sigma_{\theta,c}^{(\rho)}$ равным 1, только если ЗС типа ρ с номером c используется для выполнения опций зарядки ЭБ. Из ограничения (5) следует, что исключается учет неиспользуемых ЗС каждого типа. Согласно ограничению (6) число используемых ЗС всех типов не может превышать предельно допустимого числа $|C_\theta|$. Ограничения (7) обеспечивают выполнение любой опции зарядки не более чем на одной ЗС.

Условия баланса размещения количеств ЭБ каждого типа по депо имеют вид

$$\sum_{d \in D} x_d^{(s)}(j_{v,1}) = 1, \quad v \in V, \quad (8)$$

$$\sum_{d \in D} x_d^{(e)}(j_{v,\bar{l}_v}) = 1, \quad v \in V, \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} x_d^{(s)}(i) - \sum_{i \in I} x_d^{(e)}(i) = 0, \quad d \in D. \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I, m(i)=m} x_d^{(s)}(i) \leq Ub_{d,m}, \quad d \in D, \quad m \in BT. \quad (11)$$

Ограничения (8), (9) обеспечивают назначение единственного депо для первого и последнего рейсов, выполняемых ЭБ $v \in V$. Ограничения (10) обеспечивают баланс

для каждого депо количества выходящих и входящих ЭБ каждого типа. Ограничения (11) устанавливают предельное количество ЭБ типа m , которое может вместить депо $d \in D$.

Условия баланса уровней заряда в терминалах определяются следующим образом:

$$u_i^3 = u_i^2 - g_{i,m(i)}, i \in I, \quad (12)$$

$$u_{j_v,1}^1 = u_{m(v)}^{\max} - \sum_{d \in D} g_{d,j_v,1,m(j_v,1)} x_d^{(s)}(j_v,1) \geq u_{m(v)}^{\min}, v \in V, \quad (13)$$

$$u_{j_v,\bar{l}_v}^4 - \sum_{d \in D} g_{j_v,\bar{l}_v,d,m(j_v,\bar{l}_v)} x_d^{(e)}(j_v,\bar{l}_v) \geq u_{m(v)}^{\min}, v \in V, \quad (14)$$

$$u_{j_v,1}^2 = u_{j_v,1}^1 + \sum_{\rho \in CT} \sum_{q \in Q_{j_v,1}^-} \sum_{c \in C_{j_v,1}^{(\rho)}} f_{m(j_v,1),\rho} \tau_q^{(\rho)}, v \in V, \quad (15)$$

$$u_{j_v,\bar{l}_v}^4 = u_{j_v,\bar{l}_v}^3 + \sum_{\rho \in CT} \sum_{q \in Q_{j_v,\bar{l}_v}^+} \sum_{c \in C_{j_v,\bar{l}_v}^{(\rho)}} f_{m(j_v,\bar{l}_v),\rho} \tau_q^{(\rho)}, v \in V, \quad (16)$$

$$u_{j_v,l+1}^1 = u_{j_v,l}^4 - g_{j_v,l,j_v,l+1,m(j_v,l)}, l=1,2,..., \bar{l}_v-1, v \in V, \quad (17)$$

$$u_{j_v,l}^4 = u_{j_v,l}^3, tp_{j_v,l,j_v,l+1} = 0, l=1,2,..., \bar{l}_v-1, v \in V, \quad (18)$$

$$u_{j_v,l}^4 = u_{j_v,l}^3 + \sum_{\rho \in CT} f_{m(j_v,l),\rho} \sum_{q \in Q_{j_v,l,j_v,l+1,b_{j_v,l}}} \tau_q^{(\rho)}, tp_{j_v,l,j_v,l+1} \in \{1,2,3\}, l=1,2,..., \bar{l}_v-1, v \in V, \quad (19)$$

$$u_{j_v,l+1}^2 = u_{j_v,l+1}^1, tp_{j_v,l,j_v,l+1} = 0, l=1,2,..., \bar{l}_v-1, v \in V, \quad (20)$$

$$u_{j_v,l+1}^2 = u_{j_v,l+1}^1 + \sum_{\rho \in CT} f_{m(j_v,l+1),\rho} \sum_{q \in Q_{j_v,l,j_v,l+1,a_{j_v,l+1}}} \tau_q^{(\rho)}, tp_{j_v,l,j_v,l+1} \in \{1,2,3\}, l=1,2,..., \bar{l}_v-1, v \in V, \quad (21)$$

$$u_{j_v,l}^2 - u_{j_v,l}^1 \geq tc_{\min} \sum_{\rho \in CT} y_{q(a_{j_v,l}),\rho}^{(\rho)} f_{m(j_v,l),\rho}, l=1,2,..., \bar{l}_v, v \in V, \quad (22)$$

$$u_{j_v,l}^4 - u_{j_v,l}^3 \geq tc_{\min} \sum_{\rho \in CT} y_{q(b_{j_v,l}),\rho}^{(\rho)} f_{m(j_v,l),\rho}, l=1,2,..., \bar{l}_v, v \in V. \quad (23)$$

Условие (12) определяет уровень заряда после прибытия в терминал b_i любого рейса $i \in I$. Условия (13), (14) обеспечивают уровень заряда ЭБ при прибытии из стартового депо в стартовый терминал первого рейса (соответственно, в финишное депо после последнего рейса) не ниже нижней границы диапазона допустимых уровней заряда. Условия (15), (16) определяют уровень заряда после прибытия и возможной зарядки в стартовом терминале для первого (соответственно, конечном терминале последнего рейса) ЭБ. Условия (12), (17)–(21) определяют уровни заряда в каждом терминале после прибытия и (или) возможной зарядки для рейса $j_{v,l+1}$ непосредственно после рейса $j_{v,l}$ в задании ЭБ v в зависимости от значения параметра $tp_{j_v,l,j_v,l+1}$. Условия (22), (23) обеспечивают выполнение зарядки в начальном либо конечном терминале рейса при длительности зарядки, не меньшей чем $tc_{\min}$.

Условия для длительностей событий зарядки ЭБ на различных ЗС в терминалах определяются соотношениями

$$\sum_{c \in C_{\theta}^{(\rho)}} t_{c,q}^{(\rho)} = \tau_q^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (24)$$

$$tc_{\min} y_{c,q}^{(\rho)} \leq t_{c,q}^{(\rho)} \leq \tau_{m(q),\rho}^{\max} y_{c,q}^{(\rho)}, c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (25)$$

$$\sum_{c \in C_{\theta}^{(\rho)}} y_{c,q}^{(\rho)} = y_q^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (26)$$

$$\sum_{\rho \in CT} y_{q'}^{(\rho)} + \sum_{\rho \in CT} y_{q''}^{(\rho)} \leq 1, q' \in Q_{j_v,l,j_v,l+1,b_{j_v,l}}, q'' \in Q_{j_v,l,j_v,l+1,a_{j_v,l+1}}, v \in V, tp_{j_v,l,j_v,l+1} = 3, l=1, 2, ..., \bar{l}_v-1. \quad (27)$$

Условия (24)–(27) определяют переменные $y_{c,q}^{(p)}$, $y_q^{(p)}$ посредством $t_{c,q}^{(p)}$, $\tau_q^{(p)}$ и обеспечивают не более одной зарядки между рейсами $j_{v,l}$ и $j_{v,l+1}$ ЭБ v при $tp_{j_{v,l},j_{v,l+1}}=3$.

Моменты начала и завершения событий зарядки в терминалах должны удовлетворять условиям

$$F_{c,q} = S_{c,q} + \Delta \sum_{\rho \in CT} y_{c,q}^{(\rho)} + \sum_{\rho \in CT} t_{c,q}^{(\rho)}, \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \quad (28)$$

$$S_{c,q} \geq A_q \sum_{\rho \in CT} y_{c,q}^{(\rho)}, \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \quad (29)$$

$$F_{c,q} \leq B_q \sum_{\rho \in CT} y_{c,q}^{(\rho)}, \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \quad (30)$$

$$\sum_{\substack{c' \in \bigcup_{\rho \in CT} C_{b_i}^{(\rho)} \\ c'' \in \bigcup_{\rho \in CT} C_{a_j}^{(\rho)}}} F_{c',q'} + \gamma_{ij} \leq \sum_{\rho \in CT} S_{c'',q''} + 24(1 - \sum_{\rho \in CT} y_{q''}^{(\rho)}), \quad q' \in Q_{i,j,b_i}, q'' \in Q_{i,j,a_j}, i \in I, tp_{ij}=2. \quad (31)$$

Ограничения (28)–(31) определяют моменты старта $S_{c,q}$ и завершения $F_{c,q}$ каждой возможной опции зарядки в пределах ее допустимого диапазона и обеспечивают начало возможной зарядки на терминале a_j по прошествии длительности γ_{ij} порожнего рейса после отправления из терминала b_i .

$$(F_{c,q'} \leq S_{c,q''}) \vee (F_{c,q''} \leq S_{c,q'}), \quad c \in \bigcup_{\rho \in CT} C_{\theta}^{(\rho)}, q', q'' \in Q_{\theta}, [A_{q'}, B_{q'}] \cap [A_{q''}, B_{q''}] \neq \emptyset, \theta \in \Theta. \quad (32)$$

Ограничения (32) обеспечивают отсутствие пересечения различных событий зарядки по времени на одной ЗС любого терминала, $\vee$ – исключающее «или».

Область значений переменных задачи задают следующие ограничения:

$$y_{c,q}^{(\rho)} \in \{0,1\}, \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (33)$$

$$y_q^{(\rho)} \in \{0,1\}, \quad q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (34)$$

$$t_{c,q}^{(\rho)} \in [0, \tau_{m(q),\rho}^{\max}], \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (35)$$

$$\tau_q^{(\rho)} \in [0, \tau_{m(q),\rho}^{\max}], \quad q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (36)$$

$$\sigma_{\theta,c}^{(\rho)} \in \{0,1\}, \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (37)$$

$$\mu_{\theta}^{(\rho)} \in [0, |C_{\theta}|], \quad \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (38)$$

$$S_{c,q} \in [0, B_q], \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (39)$$

$$F_{c,q} \in [0, B_q], \quad c \in C_{\theta}^{(\rho)}, q \in Q_{\theta}, \theta \in \Theta, \rho \in CT, \quad (40)$$

$$x_d^{(s)}(i) \in \{0,1\}, \quad d \in D, i \in I, \quad (41)$$

$$x_d^{(e)}(i) \in \{0,1\}, \quad d \in D, i \in I, \quad (42)$$

$$u_{m(v(i))}^{\min} \leq u_i^1, u_i^2, u_i^3, u_i^4 \leq u_{m(v(i))}^{\max}, \quad i \in I. \quad (43)$$

Переменные $y_{c,q}^{(\rho)}$, $y_q^{(\rho)}$, $\sigma_{\theta,c}^{(\rho)}$, $x_d^{(s)}(i)$, $x_d^{(e)}(i)$ являются булевыми, а $\mu_{\theta}^{(\rho)}$ – неотрицательными целочисленными, переменные $t_{c,q}^{(\rho)}$, $\tau_q^{(\rho)}$, $u_i^1, u_i^2, u_i^3, u_i^4$, $S_{c,q}$, $F_{c,q}$ принимают неотрицательные действительные значения.

Обозначим $\Phi^*(z)$ минимальное значение целевой функции подзадачи нижнего уровня при фиксированном назначении $z \in Z$. Положим $\Phi^*(z)=\infty$, если подзадача нижнего уровня для z неразрешима.

Подзадачу (1)–(43) при фиксированном назначении $z \in Z$ будем называть также задачей $A(z)$, а $\Phi^*(z)$ – минимальным значением задачи $A(z)$.

3.2. Подзадача верхнего уровня

Напомним, что общие суточные инвестиционные и операционные затраты на парк ЭБ, зарядную инфраструктуру и электроэнергию при фиксированном назначении z ЭБ парка сервисных рейсов определяются выражением $\Psi(z) = \sum_{m \in BT} c_m^{bus} \eta_m(z) + \Phi^*(z)$, первый

член которого представляет суточные затраты на ЭБ, а $\Phi^*(z)$ – минимальное значение целевой функции подзадачи нижнего уровня. Задача верхнего уровня заключается в выборе назначения $z^* \in Z$, минимизирующего общие суточные затраты $\Psi(z)$.

Для решения задачи верхнего уровня предлагается эвристический алгоритм локального поиска (АЛП) наилучшего назначения, включающий следующие алгоритмы:

1. Алгоритм поиска первоначального назначения $z^0 \in Z$ ЭБ парка $v \in V_m$ (типа m) сервисных рейсов $i \in I_m$ (ПНСР) соответствующего им типа $\pi(i)=m$, $m \in BT = \{1, 2, \dots, \bar{m}\}$. Алгоритм ПНСР итеративно применяет алгоритм формирования первоначального задания ЭБ (ФПЗЭ) для каждого из используемых ЭБ парка типа m в порядке возрастания индекса $v \in V_m$, $m \in BT$.

2. Алгоритм порождения новых вариантов назначений $z \in Z$ посредством обмена совместимыми сервисными рейсами (ОСР) между случайно выбираемыми заданиями ω_v , ω_w пары ЭБ $v, w \in V$.

3. Алгоритм порождения новых вариантов назначений $z \in Z$ посредством переноса сервисного рейса (ПСР) $i \in I$ из случайно выбираемого задания ω_v ЭБ $v \in V_m$ в другое задание ω_w ЭБ $w \in \bigcup_{\zeta=1}^m V_\zeta$.

4. Эвристические алгоритмы Con-Greedy и Rand, предложенные в работе [15] для задачи оптимизации расписания зарядки ЭБ в единственном терминале на минимальном количестве однородных ЗС при фиксированном множестве событий зарядки с фиксированными моментами начала и завершения зарядки. Алгоритмы Con-Greedy и Rand предназначены для нахождения верхней оценки числа ЗС каждого типа для каждого терминала транспортной сети. Алгоритмы модифицируются для событий зарядки типа $tp_{i,j}=2$ на двух соседних терминалах при фиксированных длительностях зарядки на ЗС различных типов. Для корректного решения задач оптимизации расписания и состава ЗС на терминалах необходимо:

– предварительно корректировать момент возможного начала зарядки на втором терминале при положительной длительности зарядки на первом терминале;

– в зависимости от последовательности решения задач оптимизации расписания и состава ЗС определять момент начала (окончания) зарядки с учетом длительности порожнего рейса между терминалами.

Введем дополнительные обозначения, используемые далее для описания алгоритмов:

λ – коэффициент, отражающий отношение удельных расходов на порожние рейсы, выполняемые ЭБ, к общим удельным расходам на ЭБ, $\lambda \in [0, 1]$;

ε – размер окрестности моментов начала сервисных рейсов;

$A^p(z)$ – релаксированная задача СЦПП (1)–(31), (33)–(43); по сравнению с задачей $A(z)$ в ней опущены ограничения (32), запрещающие пересечение событий зарядки на любой ЗС;

Φ^{pek} – текущее рекордное (наименьшее) значение целевой функции задачи $A(z)$;

$\Phi^p = \Phi^{p*}(z)$ – оптимальное значение целевой функции релаксированной задачи $A^p(z)$ для назначения z ;

$\bar{\Phi}(z)$ – верхняя оценка значения задачи $A(z)$, полученная посредством замены в значении $\Phi^{p*}(z)$ целевой функции релаксированной задачи $A^p(z)$ компонент стоимостей ЗС терминалов стоимостями минимальных количеств ЗС терминалов, найденных с помощью алгоритмов Con-Greedy и Rand на базе решения $A^p(z)$;

z^0 – начальное назначение;

z^{mek} – текущее назначение;

z^{pek} – текущий рекорд назначения среди решений задачи $A(z)$;

$\Xi(z^{mek})$ – набор вариантов возможных назначений z' , порождаемых из z^{mek} процедурами ОСР и ПСР;

$\varphi \geq 1$ – предельное число вариантов назначений в любом наборе $\Xi(z^{mek})$;

$\chi \geq 0$ – доля предельно допустимого превышения $(1+\chi)\Phi^{pek}$ рекордного значения Φ^{pek} среди оценок $\bar{\Phi}(z)$ решений задачи $A^p(z^{mek})$ при формировании набора $\Xi(z^{mek})$ вариантов возможных назначений;

CPU – предельное время решения;

Iter – количество выполняемых итераций;

Iter_c – количество итераций без улучшения целевой функции.

3.2.1. Эвристические алгоритмы ПНСР, ФПЗЭ и процедура выбора сервисного рейса (ВСР)

Алгоритм ПНСР: первоначальное назначение сервисных рейсов ЭБ.

Вход: $I_m, V_m, m \in VT$, параметры λ, ε .

Выход: назначение z .

Алгоритм ПНСР итеративно в порядке возрастания индекса v используемых ЭБ парка типа m обращается к алгоритму формирования первоначального задания ω_v ЭБ (ФПЗЭ) для каждого $v \in V_m, m \in VT$.

Алгоритм ФПЗЭ: формирование первоначального задания ЭБ.

Вход: $v \in V_m, I^c \subseteq I_m, m \in VT$, параметры λ, ε .

Выход: задание ω_v .

Алгоритм ФПЗЭ последовательно обращается к одному из вариантов (ВСР1, ВСР2, ВСР3, ВСР4) эвристической процедуры ВСР из подмножества $I^c \subseteq I_m$ еще не распределенных сервисных рейсов типа m и проверки допустимости включения его в задание. Используемые варианты ВСР1, ВСР2, ВСР3, ВСР4 этой процедуры описаны ниже. Проверка допустимости включения очередного рейса в задание алгоритмом включает условия совместимости по времени с предыдущим рейсом уже построенной последовательности, а также условия достаточности времени пребывания ЭБ в промежуточных терминалах для пополнения заряда на ЗС с максимально возможной мощностью до уровня, обеспечивающего выполнение включаемого рейса.

Варианты эвристической процедуры ВСР выбора очередного сервисного рейса типа m

Предложенные варианты процедуры выбора рейса применяются для разнотипных сервисных рейсов процедур выбора (см. [13]) из множества однотипных сервисных рейсов, обслуживаемых идентичными ЭБ.

Посредством каждого из вариантов ВСП1, ВСП2, ВСП3, ВСП4 процедуры ВСП для каждого ЭБ $v \in V_m$ в порядке возрастания индекса v формируется максимальная по включению последовательность (задание) $\omega_v = \{j_{v,1}, j_{v,2}, \dots, j_{v,\bar{l}_v}\}$ совместимых сервисных рейсов $j_{v,l} \in I_m$, $\beta_{j_{v,l}} + \gamma_{j_{v,l}, j_{v,l+1}} \leq \alpha_{j_{v,l+1}}$, $l=1, 2, \dots, \bar{l}_v - 1$, типа m , назначаемых этому ЭБ.

Варианты процедуры ВСП отличаются способом выбора очередного сервисного рейса для рассматриваемого ЭБ: ВСП1 ориентирован на минимизацию суммарной длительности интервалов между сервисными рейсами ЭБ с целью увеличения количества выполняемых им сервисных рейсов; ВСП2 минимизирует взвешенную комбинацию дневных затрат на ЭБ и затрат на потраченную им в порожних рейсах электроэнергию; ВСП3 и ВСП4 являются рандомизированными аналогами процедуры в заданной окрестности минимального значения для ВСП1 и ВСП2 соответственно.

Используемые обозначения:

I^c – текущее подмножество нераспределенных сервисных рейсов из множества I_m ;

i^c – текущий сервисный рейс, распределяемый ЭБ v ;

ω_v^c – текущее задание ЭБ v ;

R_θ^- – доступный ресурс заряда в терминале $\theta \in \{b_i, a_j \mid i, j \in I^c\}$ перед возможной зарядкой в θ ;

R_θ^+ – доступный ресурс заряда ЭБ в терминале $\theta \in \{b_i, a_j \mid i, j \in I^c\}$ после возможной зарядки в θ ;

$D_{i^c, m}^-$ – подмножество депо из D , таких, что для каждого $d \in D_{i^c, m}^-$ заряд $g_{d, i^c, m}$, потраченный в порожнем рейсе ЭБ $v \in V_m$ из депо d в начальный терминал a_{i^c} , не может быть восстановлен на этом терминале вследствие недопустимо малой длительности зарядки $g_{d, i^c, m} < t_{cmin} \cdot \min\{f_{m, \rho} \mid \rho \in CT\}$; f_{m, ρ^*} – максимальная скорость зарядки для ЭБ типа m , $f_{m, \rho^*} = \max\{f_{m, \rho} \mid \rho \in CT\}$;

E_θ – доступная величина заряда при возможной зарядке в θ , $E_\theta \geq 0$;

γ_{ij} – длительность порожнего рейса из терминала b_i после рейса i в терминал a_j рейса j ;

$H(x)$ – ступенчатая функция Хэвисайда, $H(x)=0$ при $x<0$ и 1 при $x \geq 0$;

$\text{sgn}(x)$ – функция знака, $\text{sgn}(x)=-1$ при $x<0$, 0 при $x=0$ и 1 при $x \geq 0$.

Процедура ВСП1: выбор очередного сервисного рейса с минимальным временем начала.

Вход: i, I^c .

Выход: $j^* = \arg \min\{\alpha_j \mid j \in I^c\}$.

Процедура ВСП2: выбор очередного сервисного рейса с минимальной взвешенной суммой времени начала рейса и длительности предшествующего порожнего рейса.

Вход: i, I^c, λ .

Выход: $j^* = \arg \min\{\alpha_j + \lambda \gamma_{ij} \mid j \in I^c\}$.

Процедура ВСП3: случайный выбор очередного сервисного рейса из окрестности минимального значения момента начала.

Вход: i, I^c, ε .

Выход: j^* выбирается в множестве I^c равномерно среди значений моментов старта из отрезка $[\alpha^*, \alpha^* + \varepsilon]$, где $\alpha^* = \min\{\alpha_j \mid j \in I^c\}$.

Процедура ВСР4: случайный выбор очередного сервисного рейса из окрестности минимального значения взвешенной суммы начала рейса и длительности предшествующего порожнего рейса.

Вход: $i, I^c, \lambda, \varepsilon$.

Выход: j^* выбирается в множестве I^c равновероятно среди значений моментов старта из отрезка $[\delta_{ij}^*, \delta_{ij}^* + \varepsilon]$, где $\delta_{ij}^* = \min\{\alpha_j + \lambda \gamma_{ij} \mid j \in I^c\}$.

Эвристический алгоритм ПФЗЭ

Шаг 0. Полагаем $\omega_v^c = \emptyset$.

Шаг 1. Если $I^c = \emptyset$, то конец (ω_v^c – решение).

Иначе, если $I^c \neq \emptyset$, выбираем первый сервисный рейс $i^* = j_{v,1}$ одним из вариантов процедуры ВСР. Переход к шагу 2.

Шаг 2. Если $D \setminus D_{i^*,m}^- \neq \emptyset$, то существует депо $d^s \in D \setminus D_{i^*,m}^-$, после порожнего рейса из которого в терминал a_{i^*} выполняется $R_{a_{i^*}}^+ = u_m^{\max} - u_m^{\min}$. Тогда по условиям задачи $R_{a_{i^*}}^+ - g_{i^*,m} = u_m^{\max} - u_m^{\min} - g_{i^*,m} \geq 0$. Полагаем $i^c = i^*$, $\omega_v^c = \{i^c\}$, $R_{a_{i^c}}^+ = u_m^{\max} - u_m^{\min}$. Иначе, если $D \setminus D_{i^*,m}^- = \emptyset$ и $u_m^{\max} - u_m^{\min} - \min_{d \in D_{i^*,m}^-} g_{d,i^*,m} - g_{i^*,m} \geq 0$, полагаем $i^c = i^*$, $\omega_v^c = \{i^c\}$, $R_{a_{i^c}}^+ = u_m^{\max} - u_m^{\min} - \min_{d \in D_{i^*,m}^-} g_{d,i^*,m}$.

Определяем $R_{b_{i^c}}^- = R_{a_{i^c}}^+ - g_{i^c,m} \geq 0$.

Полагаем $I^c = I^c \setminus \{i^c\}$. Переход к шагу 3.

Иначе, если $D \setminus D_{i^*,m}^- = \emptyset$ и $u_m^{\max} - u_m^{\min} - \min_{d \in D_{i^*,m}^-} g_{d,i^*,m} - g_{i^*,m} < 0$, то i^* – недопустимый рейс.

Полагаем $I^c = I^c \setminus \{i^*\}$.

Переход к шагу 1.

Шаг 3. Если $I^c = \emptyset$, то конец (ω_v^c – решение).

Иначе для i^c ищем очередной сервисный рейс $j^* \in I^c$ одним из вариантов процедуры ВСР при выполнении условия допустимости уровня заряда в терминале b_{i^c} для порожнего рейса в a_{j^*} :

$$R_{b_{i^c}}^- + H(\alpha_{j^*} - \beta_{i^c} - \gamma_{i^c,j^*} - \Delta - tc_{min}) \cdot f_{m,p^*}(\alpha_{j^*} - \beta_{i^c} - \gamma_{i^c,j^*} - \Delta) \geq g_{i^c,j^*,m}. \quad (44)$$

Шаг 3.1. Если для j^* условие (44) не выполняется, то переход к шагу 3.2, иначе полагаем

$$E_{b_{i^c}} = \min \{ u_m^{\max} - u_m^{\min} - R_{b_{i^c}}^- ; H(\alpha_{j^*} - \beta_{i^c} - \gamma_{i^c,j^*} - \Delta - tc_{min}) \cdot f_{m,p^*}(\alpha_{j^*} - \beta_{i^c} - \gamma_{i^c,j^*} - \Delta) \},$$

$$R_{b_{i^c}}^+ = R_{b_{i^c}}^- + E_{b_{i^c}}.$$

Определяем $R_{a_{j^*}}^- = R_{b_{i^c}}^+ - g_{i^c,j^*,m}$, $E_{a_{j^*}} = \min \{ u_m^{\max} - u_m^{\min} - R_{a_{j^*}}^- ; H(\alpha_{j^*} - \beta_{i^c} - \gamma_{i^c,j^*} - \Delta - tc_{min}) \cdot f_{m,p^*}(\alpha_{j^*} - \beta_{i^c} - \gamma_{i^c,j^*} - \Delta) - \frac{E_{b_{i^c}}}{f_{m,p^*}} - \Delta \cdot \text{sgn}(E_{b_{i^c}}) - \Delta - tc_{min} \} \cdot f_{m,p^*}(\alpha_{j^*} - \beta_{i^c} - \gamma_{i^c,j^*} - \Delta - tc_{min}) - \frac{E_{b_{i^c}}}{f_{m,p^*}} - \Delta \cdot \text{sgn}(E_{b_{i^c}}) - \Delta$ и проверяем условие допустимости для сервисного рейса j^* :

$$R_{a_{j^*}}^- + E_{a_{j^*}} \geq g_{j^*,m}. \quad (45)$$

Если для j^* условие (45) не выполняется, то переход к шагу 3.2. Иначе полагаем

$$R_{a_{j^*}}^+ = R_{a_{j^*}}^- + E_{a_{j^*}}, R_{b_{j^*}}^- = R_{a_{j^*}}^+ - g_{j^*,m}.$$

Полагаем $\omega_v^c = \omega_v^c \cup \{j^*\}$, $I^c = I^c \setminus \{j^*\}$, $i^c = j^*$. Переход к шагу 3.

Шаг 3.2. Выбранный j^* недопустим, полагаем $I^c = I^c \setminus \{j^*\}$. Переход к шагу 3.

Замечание 1. Если в результате выполнения алгоритма ФПЗЭ задание $\omega_v^c = \emptyset$, то ЭБ v не используется. В этом случае $\omega_v^c = \emptyset$ для всех $v \leq o \leq \eta_m(z)$.

Замечание 2. Если при завершении работы алгоритма ПНСР $I^c \neq \emptyset$, то допустимое решение задачи не найдено.

3.2.2. Эвристические алгоритмы ОСР и ПСР

Алгоритм ОСР: обмен сервисными рейсами заданий.

Вход: задания ω_v, ω_w , рейсы $i_{v,q}, j_{w,p}$, $v, w \in V$.

Выход: модифицированные задания $\tilde{\omega}_v, \tilde{\omega}_w$.

Алгоритм ОСР сводится к построению на основе $\omega_v, \omega_w \in Z^{mek}$ пары модифицированных заданий $\tilde{\omega}_v, \tilde{\omega}_w$ посредством обмена случайно выбранными одинарными рейсами совместимых типов для каждого из заданий. Вероятности выбора заданий ω_v, ω_w и рейсов для обмена пропорциональны экономии энергозатрат при замене пары ω_v, ω_w парой $\tilde{\omega}_v, \tilde{\omega}_w$.

При заданном текущем назначении z^{mek} случайно выбираются $\omega_v = (i_{v,1}, \dots, i_{v,q-1}, i_{v,q}, i_{v,q+1}, \dots, i_{v,f_v})$, $\omega_w = (j_{w,1}, \dots, j_{w,p-1}, j_{w,p}, j_{w,p+1}, \dots, j_{w,f_w})$, $\omega_v, \omega_w \in Z^{mek}$ и по одному рейсу $i_{v,q} \in \omega_v, j_{w,p} \in \omega_w$ из них, при обмене которыми для всех рейсов пары модифицированных заданий $\tilde{\omega}_v = (i_{v,1}, \dots, i_{v,q-1}, j_{w,p}, i_{v,q+1}, \dots, i_{v,f_v})$, $\tilde{\omega}_w = (j_{w,1}, \dots, j_{w,p-1}, i_{v,q}, j_{w,p+1}, \dots, j_{w,f_w})$ выполняются временные условия совместимости

$$\beta_{i_{v,q-1}} + \gamma_{i_{v,q-1}, j_{w,p}} \leq \alpha_{j_{w,p}}, \quad (46)$$

$$\beta_{j_{w,p}} + \gamma_{j_{w,p}, i_{v,q+1}} \leq \alpha_{i_{v,q+1}}, \quad (47)$$

$$\beta_{j_{w,p-1}} + \gamma_{j_{w,p-1}, i_{v,q}} \leq \alpha_{i_{v,q}}, \quad (48)$$

$$\beta_{i_{v,q}} + \gamma_{i_{v,q}, j_{w,p+1}} \leq \alpha_{j_{w,p+1}}. \quad (49)$$

Алгоритм ПСР: перенос сервисного рейса из одного задания в другое.

Вход: задания ω_v, ω_w , рейсы $i_{v,q}, j_{w,p}$, $v, w \in V$.

Выход: модифицированные задания $\hat{\omega}_v, \hat{\omega}_w$.

Алгоритм ПСР сводится к построению на базе заданий $\omega_v, \omega_w \in Z^{mek}$ пары модифицированных заданий $\hat{\omega}_v, \hat{\omega}_w$ за счет переноса случайно выбираемого совместимого рейса $i_{v,q} \in \omega_v$ в задание ω_w после случайно выбираемого рейса $j_{w,p} \in \omega_w$.

При заданном назначении z^{mek} случайно выбираются пара заданий $\omega_v = (i_{v,1}, \dots, i_{v,q-1}, i_{v,q}, i_{v,q+1}, \dots, i_{v,f_v})$, $\omega_w = (j_{w,1}, \dots, j_{w,p}, j_{w,p+1}, \dots, j_{w,f_w})$ ЭБ $v \in V_m, w \in V_m \cup \dots \cup V_1$, $\omega_v, \omega_w \in Z^{mek}$, рейс $i_{v,q}$ из одного задания ω_v для переноса, а также рейс $j_{w,p}$ из другого задания ω_w как предшественник рейса $i_{v,q}$ в модифицированном новом задании $\hat{\omega}_w$. Вероятности выбора заданий ω_v, ω_w и рейсов $i_{v,q}, j_{w,p}$ пропорциональны экономии энергозатрат при замене пары

ω_v, ω_w парой $\hat{\omega}_v, \hat{\omega}_w$. Строится пара модифицированных заданий $\hat{\omega}_v = (i_{v,1}, \dots, i_{v,q-1}, i_{v,q+1}, \dots, i_{v,f_v})$, $\hat{\omega}_w = (j_{w,1}, \dots, j_{w,p}, i_{v,q}, j_{w,p+1}, \dots, j_{w,f_w})$ за счет переноса рейса $i_{v,q}$ из задания ω_v и включения его в задание ω_w после рейса $j_{w,p}$ при выполнении временных условий совместности

$$\beta_{i_{v,q-1}} + \gamma_{i_{v,q-1}, i_{v,q+1}} \leq \alpha_{j_{w,q+1}}, \quad (50)$$

$$\beta_{j_{w,p}} + \gamma_{j_{w,p}, i_{v,q}} \leq \alpha_{i_{v,q}}, \quad (51)$$

$$\beta_{i_{v,q}} + \gamma_{i_{v,q}, j_{w,p+1}} \leq \alpha_{j_{w,p+1}}. \quad (52)$$

Замечание 3. При использовании алгоритма ПСР в некоторых случаях количество $|V_m|$ применяемых ЭБ типа m может быть сокращено при сохранении неизменным количества ЭБ других типов.

3.2.3. Эвристический алгоритм локального поиска АЛП

Алгоритм АЛП: построение назначения $z^* \in Z$.

Вход: I, V , параметры χ, φ .

Выход: z^* .

Шаг 0. Строится множество Z^0 первоначальных назначений с помощью итеративного применения алгоритма ПНСР.

Шаг 1. Пока $Z^0 \neq \emptyset$, выбирается произвольное первоначальное назначение $z^0 \in Z^0$.

Шаг 2. Решается задача $A(z^0)$. Если $\Phi^*(z^0) < \infty$, то z^0 принимается в качестве рекорда назначения для исходной задачи $z^{pek} := z^0$, также полагается $\Phi^{pek} = \Phi^*(z^{pek})$, $z^{mek} = z^0$ и $\Xi(z^{mek}) = \{z^0\}$. Переход к шагу 3. Иначе, если $\Phi^*(z^0) = \infty$, для z^0 задача неразрешима. Полагается $Z^0 = Z^0 \setminus \{z^0\}$. Переход к шагу 1.

Шаг 3. Итеративно, пока $|\Xi(z^{mek})| \leq \varphi$ и множество кандидатов пар заданий из z^{mek} для обмена рейсами непусто, для z^{mek} применяется алгоритм ОСР порождения новых вариантов назначений z' посредством случайно выбираемых двух заданий $\omega_v, \omega_w \in z^{mek}$ и рейсов этих заданий на обмен. Для варианта z' , полученного алгоритмом ОСР, решается релаксированная задача $A^p(z')$ и с помощью алгоритмов Con-Greedy и Rand вычисляется верхняя оценка $\bar{\Phi}(z')$. Если $\Phi^*(z') = \infty$ либо $\bar{\Phi}(z') > (1+\chi)\Phi^{pek}$, то вариант исключается из рассмотрения. Иначе при $\bar{\Phi}(z') \leq (1+\chi)\Phi^{pek}$ полагается $\Xi(z^{mek}) = \Xi(z^{mek}) \cup \{z'\}$. Варианты в $\Xi(z^{mek})$ упорядочиваются в порядке возрастания оценки $\bar{\Phi}(z)$.

Шаг 4. Для каждого $z \in \Xi(z^{mek})$ решается задача $A(z)$. Если $\min \{\Phi^*(z) | z \in \Xi(z^{mek})\} < \Phi^{pek}$, то рекорд назначения обновляется $z^{pek} := \arg \min \{\Phi^*(z) | z \in \Xi(z^{mek})\}$, полагается $\Phi^{pek} := \Phi^*(z^{pek})$, $z^{mek} := z^{pek}$ и переход к шагу 3. Иначе, если $z^{mek} = z^{pek}$ (рекорд не изменился), полагается $\Xi(z^{mek}) = \{z^{pek}\}$ и переход к шагу 5.

Шаг 5. Итеративно, пока $|\Xi(z^{mek})| \leq \varphi$ и множество кандидатов пар заданий из z^{mek} для переноса рейсов непусто, для z^{mek} применяется алгоритм ПСР порождения новых вариантов назначений z' посредством случайно выбираемых из z^{mek} заданий, рейсов этих заданий и переноса этих рейсов из одного задания в другое. Для варианта z' , полученного алгоритмом ПСР, решается релаксированная задача $A^p(z')$ и вычисляется верхняя оценка $\bar{\Phi}(z')$. Если $\Phi^*(z') = \infty$ либо $\bar{\Phi}(z') > (1+\chi)\Phi^{pek}$, то вариант исключается из рассмотрения. Иначе при $\bar{\Phi}(z') \leq (1+\chi)\Phi^{pek}$ полагается $\Xi(z^{mek}) = \Xi(z^{mek}) \cup \{z'\}$. Варианты в $\Xi(z^{mek})$ упорядочиваются в порядке возрастания оценки $\bar{\Phi}(z)$.

Шаг 6. Для каждого $z \in \Xi(z^{mek})$ решается задача $A(z)$. Если $\min \{\Phi^*(z) | z \in \Xi(z^{mek})\} < \Phi^{pek}$, то рекорд назначения обновляется $z^{pek} := \arg \min \{\Phi^*(z) | z \in \Xi(z^{mek})\}$, полагается $\Xi(z^{mek}) = \{z^{pek}\}$ и переход к шагу 5. Иначе, если $z^{mek} = z^{pek}$ (рекорд не изменился), то полагается $z^* := z^{pek}$, $\Phi^* := \Phi^*(z^{pek})$. Переход к шагу 1.

Последовательность шагов 0–6 алгоритма АЛП повторяется до тех пор, пока не выполнится хотя бы один из критериев останова по заданным предельным значениям параметров: CPU – время решения, Iter – число выполняемых итераций, Iter_c – число итераций без улучшения значения целевой функции.

Замечание 4. Используемые в алгоритме АЛП параметры мощности φ множества рассматриваемых вариантов назначений и доли χ предельно допустимого превышения рекордного значения целевой функции предназначены для выхода из окрестности локального оптимума в процессе поиска решения задачи. Предполагаемые оценки диапазонов целесообразных значений параметров φ и χ представляются отрезками [3, 10] и [0,1, 0,3] соответственно. Эффективность подбора этих значений зависит от проблемной ситуации, определяемой соотношением капитальных и операционных затрат на компоненты ЭБ, ЗС транспортной системы, характеристиками маршрутов, тарифами и т. п., а также от размерности решаемой задачи (мощности парка ЭБ, размеров транспортной сети и количества выполняемых рейсов).

Заключение

Разработаны математическая модель и декомпозиционная двухуровневая схема решения задачи оптимизации состава разнотипного парка ЭБ, распределения ЭБ по депо из заданного набора, назначения ЭБ на разнотипные сервисные рейсы из заданного множества, мест размещения и состава размещаемых на терминалах маршрутов разнотипных ЗС различной мощности, а также расписания зарядки на них в течение дня. Подзадача нижнего уровня заключается в оптимизации распределения ЭБ по депо, комплектации терминалов маршрутов ЗС и расписаний зарядки ЭБ при фиксированных составе парка и назначении рейсов ЭБ. Подзадача верхнего уровня состоит в выборе эффективного назначения ЭБ парка последовательностей рейсов. Для подзадачи нижнего уровня разработана новая модель смешанного целочисленного линейного программирования. Для подзадачи верхнего уровня предложен комплекс эвристических алгоритмов построения первоначального назначения и локального поиска за счет обмена сервисными рейсами различных последовательностей и перемещения рейсов из одной последовательности в другую. В дальнейшем целесообразно провести экспериментальную проверку предложенных модели и методов на реальных примерах транспортной сети с использованием парка разнотипных ЭБ. Интерес также представляет исследование совместимости ЭБ различных типов с разными типами ЗС.

Вклад авторов. Н. Н. Гуцинским уточнена модель смешанного целочисленного линейного программирования для подзадачи нижнего уровня, а также внесены корректировки в схему алгоритма локального поиска. М. Я. Ковалевым выполнена верификация предложенных математической модели, декомпозиционной схемы и методов решения подзадач, а также редактирование статьи. Б. М. Розиным предложена постановка задачи и двухуровневая декомпозиционная схема ее решения. Для подзадачи нижнего уровня при фиксированных последовательностях сер-

висных рейсов для ЭБ парка разработана модель смешанного целочисленного линейного программирования. Для подзадачи верхнего уровня предложен эвристический алгоритм локального поиска. Представлена первоначальная версия текста статьи.

Список использованных источников

1. Dirks, N. On the integration of battery electric buses into urban bus networks / N. Dirks, M. Schiffer, G. Walther // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2022. – Vol. 139. – Art. 103628. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X22000730?via%3Dihub> (date of access: 13.04.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103628>.
2. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service / Z. Gao, Z. Lin, T. J. LaClair [et al.] // *Energy*. – 2017. – Vol. 122. – P. 588–600.
3. Olsson, O. Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems / O. Olsson, A. Grauers, S. Pettersson // *EVS29 Intern. Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symp., Montreal, Quebec, Canada, June 2016*. – Montreal, 2016. – URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1159796/FULLTEXT01.pdf> (date of access: 13.04.2026).
4. Fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service / N. Guschinsky, M. Y. Kovalyov, B. Rozin, N. Brauner // *Computers and Operations Research*. – 2021. – Vol. 135. – Art. 105449. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054821002021?via%3Dihub> (date of access: 13.04.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105449>.
5. Designing fast-charge urban electric bus services: An Integer Linear Programming model / O. Battaïa, A. Dolgui, N. Guschinsky, M. Y. Kovalev // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2023. – Vol. 171. – Art. 103065. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554523000534?via%3Dihub> (date of access: 13.04.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103065>.
6. Nath, R. B. On the impact of co-optimizing station locations, trip assignment, and charging schedules for electric buses / R. B. Nath, T. Rambha, M. Schiffer // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2024. – Vol. 167. – Art. 104839. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2403.09763> (date of access: 13.04.2026).
7. Integrated solution for electric bus timetabling and vehicle scheduling combined with choices of charging locations / N.-H. Quttineh, C. H. Häll, E. J. Ekström, A. Ceder // *Journal of Public Transportation*. – 2023. – Vol. 25. – Art. 100055. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077291X23000164> (date of access: 13.04.2026).
8. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure / M. Rogge, E. van der Hurk, A. Larsen, D. U. Sauer // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 211. – P. 282–295.
9. Liu, T. Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers / T. Liu, A. Ceder // *Transportation Research Part C*. – 2020. – Vol. 114. – P. 118–139.
10. Enhancing public transportation sustainability: Insights from electric bus scheduling and charge optimization / F. Behnia, S. S. M. N. Souq, B.-A. Schuelke-Leech, M. Mirhassani // *Sustainable Cities and Society*. – 2025. – Vol. 125. – Art. 106298. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670725001751?via%3Dihub> (date of access: 13.04.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106298>.
11. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport / E. Yao, T. Liu, T. Lu, Y. Yang // *Sustainable Cities and Society*. – 2020. – Vol. 52. – Art. 101862. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670719318098> (date of access: 13.04.2026).
12. Mixed electric bus fleet scheduling problem with partial mixed-route and partial recharging / A. Zhang, T. Li, Y. Zheng [et al.] // *International Journal of Sustainable Transportation*. – 2021. – Vol. 16. – P. 73–83.

13. Гущинский, Н. Н. О совместной оптимизации размещения зарядных станций, маршрутизации электробусов и расписаний зарядки / Н. Н. Гущинский, М. Я. Ковалев, Б. М. Розин // Информатика. – 2025. – Т. 22, № 4. – С. 7–23. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-4-7-23>.

14. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи : пер. с англ. / М. Гэри, Д. Джонсон. – М. : Мир, 1982. – 462 с.

15. Cost minimizing decisions on equipment and charging schedule for electric buses in a single depot / N. Guschinsky, M. Y. Kovalyov, E. Pesch, B. Rozin // *Transportation Research Part E*. – 2023. – Vol. 180. – Art. 103337. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554523003253?via%3Dihub> (date of access: 13.04.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103337>.

References

1. Dirks N., Schiffer M., Walther G. On the integration of battery electric buses into urban bus networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, vol. 139, art. 103628. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X22000730?via%3Dihub> (accessed 13.04.2026). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103628>.

2. Gao Z., Lin Z., LaClair T. J., Liu C., Li J.-M., ..., Ward J. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, 2017, vol. 122, pp. 588–600.

3. Olsson O., Grauers A., Pettersson S. Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems. *EVS29 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Montreal, Quebec, Canada, June 2016*. Montreal, 2016. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1159796/FULLTEXT01.pdf> (accessed 13.04.2026).

4. Guschinsky N., Kovalyov M. Y., Rozin B., Brauner N. Fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service. *Computers and Operations Research*, 2021, vol. 135, art. 105449. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054821002021?via%3Dihub> (accessed 13.04.2026). <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105449>.

5. Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N., Kovalev M. Y. Designing fast-charge urban electric bus services: An Integer Linear Programming model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, vol. 171, art. 103065. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554523000534?via%3Dihub> (accessed 13.04.2026). <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103065>.

6. Nath R.B., Rambha T., Schiffer M. On the impact of co-optimizing station locations, trip assignment, and charging schedules for electric buses. *Transportation research Part C: Emerging technologies*, 2024, vol. 167, art. 104839. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2403.09763> (accessed 13.04.2026).

7. Quttineh N.-H., Häll C. H., Ekström E. J., Ceder A. Integrated solution for electric bus timetabling and vehicle scheduling combined with choices of charging locations. *Journal of Public Transportation*, 2023, vol. 25, art. 100055. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077291X23000164> (accessed 13.04.2026).

8. Rogge M., van der Hurk E., Larsen A., Sauer D. U. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 2018, vol. 211, pp. 282–295.

9. Liu T., Ceder A. Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers. *Transportation Research Part C*, 2020, vol. 114, pp. 118–139.

10. Behnia F., Souq S. S. M. N., Schuelke-Leech B.-A., Mirhassani M. Enhancing public transportation sustainability: Insights from electric bus scheduling and charge optimization. *Sustainable Cities and Society*, 2025, vol. 125, art. 106298. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670725001751?via%3Dihub> (accessed 13.04.2026). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106298>.

11. Yao E., Liu T., Lu T., Yang Y. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. *Sustainable Cities and Society*, 2020, vol. 52, art. 101862. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670719318098> (accessed 13.04.2026).
12. Zhang A., Li T., Zheng Y., Li X., Abdullah M., Dong C. Mixed electric bus fleet scheduling problem with partial mixed-route and partial recharging. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2021, vol. 16, pp. 73–83.
13. Guschinsky N. N., Kovalyov M. Y., Rozin B. M. *On the joint optimization of charging stations location, electric bus routing and charging scheduling*. *Informatika [Informatics]*, 2025, vol. 22, no. 4, pp. 7–23 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-4-7-23>.
14. Garey M. R., Johnson D. S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. (Series of Books in the Mathematical Sciences). W. H. Freeman and Company, 1979, 340 p.
15. Guschinsky N., Kovalev M. Y., Pesch E., Rozin B. Cost minimizing decisions on equipment and charging schedule for electric buses in a single depot. *Transportation Research Part E*, 2023, vol. 180, art. 103337. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554523003253?via%3Dihub> (accessed 13.04.2026). <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103337>.

Информация об авторах

Гуцинский Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

E-mail: gyshin@newman.bas-net.by
<http://orcid.org/0000-0003-1166-2387>

Ковалев Михаил Яковлевич, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

E-mail: kovalyov_my@newman.bas-net.by
<http://orcid.org/0000-0003-0832-0829>

Розин Борис Матвеевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

E-mail: rozin@newman.bas-net.by
<http://orcid.org/0000-0003-3814-6569>

Information about the authors

Nikolai N. Guschinsky, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Leading Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: gyshin@newman.bas-net.by
<http://orcid.org/0000-0003-1166-2387>

Mikhail Y. Kovalyov, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Principal Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: kovalyov_my@newman.bas-net.by
<http://orcid.org/0000-0003-0832-0829>

Boris M. Rozin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Leading Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: rozin@newman.bas-net.by
<http://orcid.org/0000-0003-3814-6569>

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ COMPUTER-AIDED DESIGN

УДК 681.5.015
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-49-61>

Поступила в редакцию | Received 17.06.2026
Подписана в печать | Accepted 07.07.2026
Опубликована | Published 30.09.2026

Развитие компьютерной технологии моделирования остаточных сварочных явлений

М. В. Жуковец

E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целями работы являются демонстрация возможности применения компьютерной технологии моделирования остаточных сварочных явлений, сравнение с результатами аналитического расчета классических примеров сварных конструкций, представление проекта программного комплекса по автоматизации расчета остаточных явлений сварных конструкций.

Методы. Предлагается силовой метод расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных конструкций общего назначения на примере расчета балочных и оболочечных сварных конструкций. Приводится описание существующих подходов для расчета сварочных явлений, а также программного комплекса, реализующего силовой метод расчета НДС сварных конструкций. Анализируются перспективы перехода на параллельные архитектуры и дальнейшего развития и применения силового метода.

Результаты. Показана хорошая сходимость результатов расчета деформаций сварных конструкций в сравнении с аналитическими методами и возможность автоматизации создания компьютерных моделей расчета остаточных сварочных явлений на примере проекта программного комплекса.

Заключение. Представлены главные направления развития и преимущества технологии: снижение трудоемкости, интеграция в САПР, оптимизация сборочных процессов, масштабируемость. Описаны перспективы перехода на параллельные архитектуры.

Ключевые слова: компьютерная технология, компьютерные модели, сварные конструкции общего назначения, остаточные сварочные явления, напряженно-деформированное состояние, силовой метод расчета, аналитические методы расчета, программный комплекс, параллельные архитектуры

Для цитирования. Жуковец, М. В. Развитие компьютерной технологии моделирования остаточных сварочных явлений / М. В. Жуковец // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 3. – С. 49–61. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-49-61>.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Development of computer technology for modeling residual welding phenomena

Mikhail V. Zhukavets

E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

Abstract

Objectives. The objectives of the work are to demonstrate the possibility of applying computer technology for modeling residual welding phenomena and compare them with the results of analytical calculations for classic welded structures. A software package project for automating the calculation of residual welding phenomena is presented.

Methods. The principles of applying the force-based method for calculating the stress-strain state (SSS) of general-purpose welded structures are demonstrated using the example of beam and shell welded structures. A description of existing approaches for calculating welding phenomena is provided, as well as a software package implementing the force-based method for calculating the SSS of welded structures. Prospects for transitioning to parallel architectures and further development and application of the force-based method are analyzed.

Results. Good convergence of the results of calculating deformations of welded structures in comparison with analytical methods and the possibility of automating the creation of computer models for calculating residual welding phenomena are shown, using the example of a software complex project.

Conclusion. The main directions of development and advantages of the technology are highlighted: reduction of labor intensity, CAD integration, optimization of assembly processes, and scalability. Prospects for transitioning to parallel architectures are discussed.

Keywords: computer technology, computer models, general-purpose welded structures, residual welding phenomena, stress-strain state, force calculation method, analytical calculation methods, software package, parallel architectures

For citation. Zhukavets M. V. *Development of computer technology for modeling residual welding phenomena*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 3, pp. 49–61 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-49-61>.

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

Введение

Актуальность развития компьютерных технологий моделирования остаточных явлений (напряжений и деформаций) дуговой сварки обусловлена необходимостью повышения надежности ответственных конструкций и снижения затрат на их производство. Можно выделить главные аспекты актуальности:

1. Возможность прогнозирования ресурса сварных конструкций: компьютерное моделирование позволяет выявлять критические зоны на этапе проектирования.
2. Снижение материальных и временных затрат: компьютерное моделирование позволяет отказаться от многочисленных дорогостоящих натурных экспериментов, снижая трудоемкость и расход металла.

3. Возможность оптимизировать параметры режима сварки: компьютерное моделирование помогает подобрать лучшее соотношение сварочного тока, скорости сварки и теплоотвода, чтобы минимизировать деформации, вызванные неравномерным нагревом металла.

4. Лучшее понимание сложности физических процессов: компьютерное моделирование позволяет наглядно представить сложные высокотемпературные теплофизические и термомеханические процессы.

5. Цифровизация производства: внедрение информационных систем для определения параметров сварки разнородных материалов является частью глобального перехода к Индустрии 4.0.

1. Развитие теории и методов расчета напряжений и деформаций сварных конструкций

Суть представленного в статье нового силового подхода – это развитие метода собственных деформаций, имеющего единую физическую природу с упрощенными теориями расчета сварочных напряжений и деформаций. Изобретателем метода собственных деформаций (Inherent Strain Method) [1, 2] является легендарный японский ученый Юкио Уэда (Yukio Ueda), который предложил измерять или вычислять деформацию в зоне шва один раз, а затем прикладывать ее как нагрузку к большой модели. Это позволило с высокой точностью предсказывать перекосы огромных судовых секций.

Метод собственных деформаций – это подход в механике твердого деформируемого тела, основанный на анализе внутренних деформаций, возникающих без внешней нагрузки. Он используется для расчета напряжений, вызванных структурными изменениями, неравномерным нагревом или сваркой. В сварке метод применяется для определения остаточных напряжений и деформаций, возникающих из-за неравномерного распределения температур. Собственные деформации в этом контексте называют остаточными напряжениями после остывания.

Главное преимущество метода собственных деформаций заключается в том, что вместо моделирования всего сложного процесса нагрева и остывания во времени (что требует огромных ресурсов) метод фокусируется на финальном результате – собственной деформации, которая остается в металле после термического цикла.

Из теории метода делается предположение, что из-за локального нагрева металл расширяется, но ему мешают окружающие холодные участки. Происходит пластическая деформация (собственная деформация), которую прикладывают к упругой модели детали как эквивалентную нагрузку. В результате система приходит в равновесие и происходят итоговые коробления и распределение напряжений в теле конструкции.

Основные достоинства метода собственных деформаций заключаются в скорости расчета – метод в десятки раз быстрее, чем полноценный термомеханический расчет, и позволяет считать огромные сборки или детали с тысячами слоев 3D-печати. Необходимую точность расчета можно достичь при правильной калибровке (на основе небольших тестовых образцов), что дает результаты, близкие к реальным замерам. Этот метод сейчас является стандартом в программном обеспечении для моделирования аддитивного производства (Ansys Additive, Simufact Additive, Netfabb).

Следует упомянуть упрощенные методы расчета сварочных напряжений и деформаций, созданные советскими учеными. Такие методы возникли как инженерная альтернатива сложным термомеханическим задачам для быстрого проектирования сварных конструкций. В основе многих упрощенных методов лежит теория Окерблома (разработанная советским ученым Н. О. Окербломом в 1940–50-х гг.), которая заменила трудоемкие математические вычисления. В 1958 г. книга [3] была переведена на английский язык и издана в Лондоне [4], получив мировое признание, что сделало метод Окерблома стандартом международного уровня.

Упрощенные теории расчета позволяют оценить состояние конструкции без сложных конечно-элементных моделей. В их основе лежат допущения о жесткопластическом поведении металла и линейном распределении температур.

Основные подходы упрощенных теорий расчета НДС:

1. Теория Г. А. Николаева (метод сечений) [5]. Основана на гипотезе плоских сечений. Предполагается, что в зоне нагрева выше критической температуры металл течет пластически, а после остывания там остаются остаточные напряжения, равные пределу текучести. Это позволяет аналитически рассчитать прогиб и укорочение.

2. Метод фиктивных (усадочных) сил [6]. Сварной шов и прилегающая зона рассматриваются как источник внутренних растягивающих сил. Предполагается, что шов (зона сплавления (ЗС)) сжимается, но основной металл ему мешает. Зная погонную энергию сварки, можно вычислить усадочную силу и определить общую деформацию сварной конструкции.

3. Метод Н. О. Окерблома [7] – упрощенный графический и аналитический способ определения деформаций изгиба. Он связывает коэффициент поперечной усадки с площадью поперечного сечения шва и жесткостью конструкции.

Следует упомянуть фундаментальный труд К. М. Гатовского и В. А. Кархина [8], ставший классическим пособием для вузов и настольной книгой инженеров в области физики и механики сварочных процессов. Пособие описывает законы распределения температурных полей в металлах ($T(x, y, z, t)$), механизмы формирования термических и структурных напряжений, методы прогнозирования и способы снижения остаточных деформаций тонколистовых и массивных конструкций. Это пособие до сих пор считается базовым для студентов машиностроительных и кораблестроительных специальностей.

Автор настоящей статьи на основе трудов доктора технических наук С. В. Медведева [9, 10] создал новые модели и алгоритмы компьютерного моделирования при дуговой сварке. Фактически научная работа является продолжением развития упрощенных теорий расчета НДС сварных конструкций, представленных в трудах Г. А. Николаева [5], Н. Н. Рыкалина [6], Н. О. Окерблома [3, 4, 7], К. М. Гатовского и В. А. Кархина [8].

Методика включает в себя модели и алгоритмы прогнозирования остаточного ресурса и работоспособности сварных конструкций с учетом их внутреннего напряженного состояния. Она позволяет снизить время создания моделей прогнозирования остаточных явлений при дуговой сварке на этапах конструкторской и технологической подготовок. Программный комплекс на основе новой методики дает возможность реализовывать модели и алгоритмы как в программном обеспечении на базе открытых кодов, так и в версиях для суперкомпьютерного окружения.

Все вышеприведенное позволяет в совокупности значительно уменьшить время расчета сварных конструкций общего назначения, а также дает возможность конструкторской службе в приемлемое время получить представление о величине и направлении остаточных деформаций с закладываемыми на сборочных чертежах допусками.

2. Новый подход расчета напряжений и деформаций сварных конструкций

Принципы данного метода (силового) подробно описаны в статье [11], где было указано, что главным источником изложенной концепции силового метода являются положения упрощенной теории сварочных напряжений и деформаций [9, 10, 12]. За прошедшее время метод был доработан на базе конечно-элементного программного комплекса *Salome* (версия 9.7.0). Зона термического влияния (ЗТВ) и ЗС стали задаваться на основе базовых примитивов (цилиндров), центры которых совпадают с точкой приложения сварочного источника (рис. 1). Центры примитивов повторяют траекторию движения сварочного источника. Примитивы в конечно-элементных комплексах очень удобны в плане автоматизированной параметризации и последующего разбиения геометрических тел на конечные элементы. Кроме того, при преобразовании поверхностей примитивов в контактные поверхности уменьшается количество ошибок конечно-элементной сетки. На рис. 1 показана геометрия ЗТВ и ЗС нахлесточного сварного соединения двух пластин.

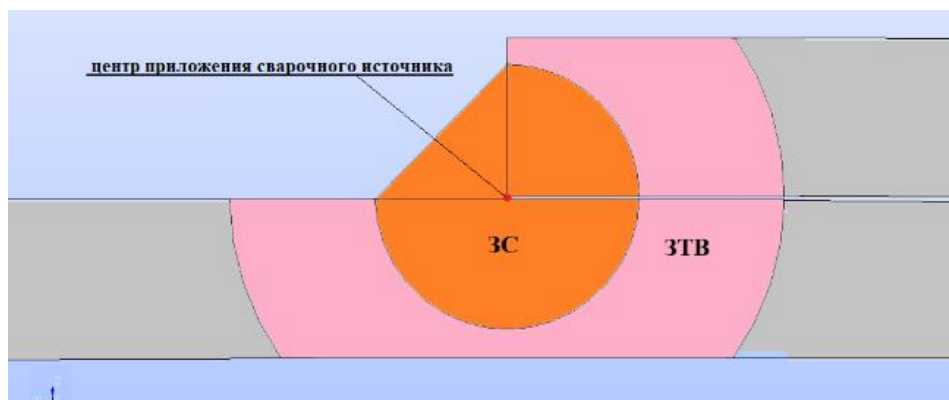


Рис. 1. Геометрия ЗТВ и ЗС нахлесточного сварного соединения

Fig. 1. Geometry of the HAZ (heat-affected zone) and FZ (fusion zone) of the lap welded joint

Силовой метод заменяет собой термомеханическую задачу. Поэтому параметры, важные при моделировании тепловых процессов: температурные коэффициенты линейного расширения α , теплопроводность λ , объемная теплоемкость C' , коэффициент теплоотдачи с поверхности α_m , заменяются на силы (давление, равное пределу текучести металла σ_T).

В процессе остывания в ЗТВ и ЗС преобладают высокие продольные растягивающие напряжения, достигающие σ_T , но так как ЗТВ ограничивает основной металл конструкции, то эти напряжения в зоне ЗТВ меняют знак и преобразуются в поперечные сжимающие напряжения. Растягивающие напряжения остаются на концах ЗТВ и ЗС.

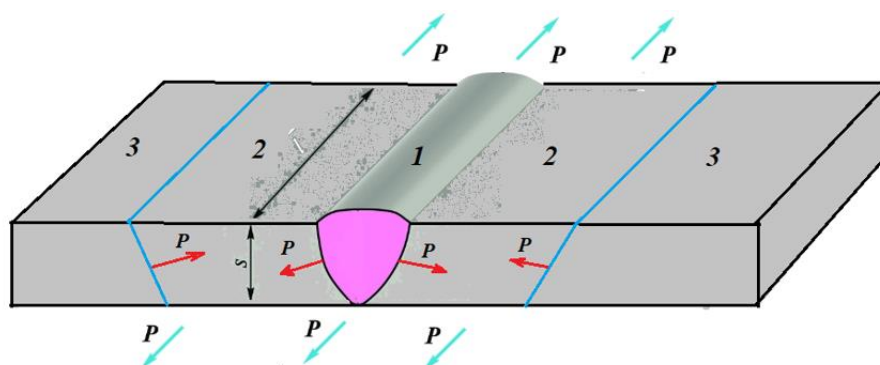


Рис. 2. Схема приложения давлений, равных σ_T , на модель свариваемых пластин при использовании силового метода: 1 – ЗС, 2 – ЗТВ, 3 – основной металл

Fig. 2. Scheme of pressure application equal to the yield strength on the model of welded plates using the force method: 1 – FZ, 2 – HAZ, 3 – base material (metal)

Для воссоздания поперечной усадочной силы $P_{ус.п}$ давление, равное σ_T металла, прикладывается на границе ЗС и ЗТВ, ЗТВ и основного металла. При этом создается эффект растяжения ЗС и сжатия ЗТВ. На концах ЗС и ЗТВ прикладывается растягивающая сила, равная σ_T металла. Схема приложения давлений на примере стыкового шва показана на рис. 2.

3. Применение компьютерной технологии на классических примерах сварных конструкций

Для проверки работоспособности метода был взят пример из современного учебника А. С. Куркина [13, с. 158–159], где с помощью аналитического метода был рассчитан прогиб балки от сварки швов. Сечение балки – тавр (рис. 3), сваренный из пластин двухсторонним угловым швом. К полке тавра таким же швом приварено поперечное ребро. Материал сварной конструкции – сталь обычного качества: $\sigma_T = 240$ МПа, $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $C' = 5 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К})$.

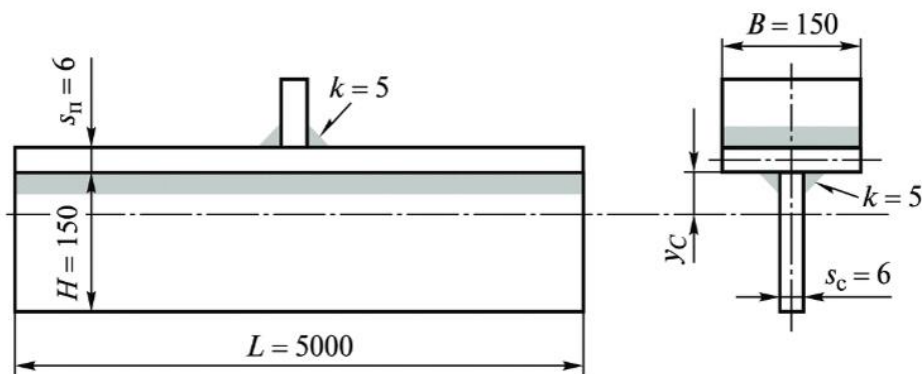


Рис. 3. Схема сварной балки

Fig. 3. Welded beam diagram

В аналитическом расчете максимальный прогиб от продольной усадки $f_{\text{прод}} = 18,4$ мм, максимальный поперечный прогиб (в середине длины балки) $f_{\text{поп}} = 0,54$ мм. Суммарный прогиб $f = f_{\text{прод}} + f_{\text{поп}} = 18,4 + 0,54 \approx 19$ мм.

В расчете аналитического примера выбиралась сварка в CO_2 . Следовательно, экспериментальный коэффициент удельного погонного тепловложения, определяющий количество энергии, которая затрачивается на проплавление единицы объема металла, $Q_v = 38$ Дж/мм³. Коэффициент Q_v важен для определения эффективной энергии сварки $q_{\text{э}}$ по площади сечения металла шва $A_{\text{напл}}$:

$$q_{\text{э}} \approx A_{\text{напл}} Q_v. \quad (1)$$

В силовом методе компьютерной технологии $A_{\text{напл}}$ ЗС определялась через поперечное сечение примитива – цилиндра с радиусом, равным катету шва $r = 5$ мм. Соответственно, $A_{\text{напл}} \approx 78,54$ мм² и $q_{\text{э}} \approx 2984,5$ Дж/мм.

Для определения ширины ЗТВ использовалась измененная формула профессора Н. Н. Рыкалина (скорость сварки $v_{\text{св}}$ принималась мгновенной) [6, 14]:

$$b_1 = q_{\text{э}} / (\delta \cdot c \cdot \gamma \cdot t_{\text{пласт}}), \quad (2)$$

где $q_{\text{э}}$ – эффективная мощность сварочной дуги (кал) без учета времени t ; δ – толщина пластины, см; c – теплоемкость металла, кал/г · град, для стали $c = 0,11$ кал/г · град; γ – удельный вес, г/см³; $t_{\text{пласт}}$ – температура изотермы зоны пластичности (ЗТВ), для стали $t_{\text{пласт}} = 650$ °C.

Согласно расчету $b_1 = 10$ мм. Соответственно, радиус объемного примитива ЗТВ-цилиндра, откладываемого от траектории движения сварочного источника, равен сумме радиуса ЗС $r = 5$ мм и ширины ЗТВ $b_1 = 21$ мм, т. е. радиус ЗТВ 26 мм.

После расчета балки по новой методике силового метода в программном комплексе *Salome* (версия 9.7.0) в решателе *Code_Aster* прогиб балки получился равным 21 мм, что находится в пределах 15 % отличия от аналитического расчета (рис. 4).

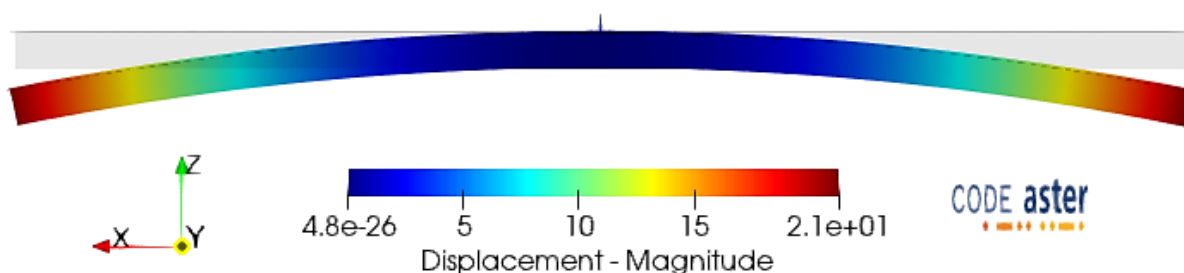


Рис. 4. Расчет прогиба балки в решателе *Code_Aster* (*Salome* (версия 9.7.0))

Fig. 4. Calculation of beam deflection in the *Code_Aster* solver (*Salome* (version 9.7.0))

В учебнике А. С. Куркина [13] также подробно рассмотрены напряжения и деформации в цилиндрических оболочках, в частности стальных трубах. В аналитическом примере на с. 174 заданы две одинаковые стальные трубы, сваренные встык, диамет-

ром 600 мм и толщиной стенки 3 мм. Среди входных данных задана только распределенная нагрузка в результате продольной усадки $q_{yc} = 60$ Н/мм. Требовалось определить максимальный прогиб стенки трубы. В результате аналитического решения максимальный прогиб стенки трубы составил $w = 0,24$ мм.

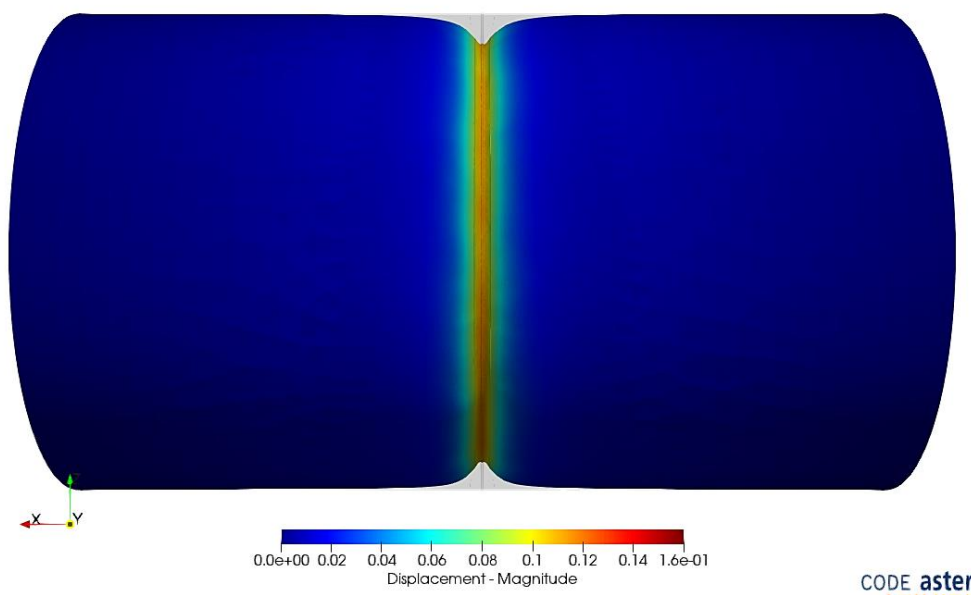


Рис. 5. Результат статического расчета деформации стальной трубы обычного качества, мм
Fig. 5. Result of the static calculation of deformation an ordinary quality steel pipe, mm

Из-за ограниченного количества входных данных для компьютерной технологии расчета НДС были приняты наиболее вероятные входные параметры – сталь обычного качества Ст3 со следующими характеристиками: $\sigma_T = 240$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, $E = 200$ ГПа. Результатом статического расчета являются прогиб и сжатие сечения трубы в районе шва 0,16 мм (рис. 5). Это значение на 33 % отличается от аналитического расчета, что обусловлено ограниченностью информации о входных данных проведения компьютерного моделирования. Главное, что не был указан вид применяемой сварки. Для этой задачи делалось предположение, что использовалась ручная дуговая сварка, для которой коэффициент удельного погонного тепловложения $Q_v = 65$ Дж/мм³. На основе данного коэффициента ширина ЗТВ составила $b_1 = 26$ мм.

4. Структура программного комплекса, последовательность работ

Для автоматизации построения ЗТВ и ЗС сварных конструкций в программном комплексе *Salome* использовался модуль визуального программирования и автоматизации *YACS*, который позволяет связывать этапы инженерного анализа (построение геометрии, сетки, расчеты в *Code_Aster*) в единые блок-схемы. На рис. 6 изображен алгоритм автоматизации моделирования сварных конструкций с помощью модуля *YACS* от момента импорта геометрической модели до расчета в решателе *Code_Aster*. Необходимым условием выполнения алгоритма является создание готовых подгружаемых схем в формате *XML*, содержащих скрипты создания геометрических тел ЗТВ и ЗС на основе

входных данных толщины стенок сварных конструкций и катетов шва (геометрия ЗС), а также взаимного расположения свариваемых стенок (торцевые, стыковые, нахлесточные швы и т. д.). Пользователь в модуле YACS вводит только начало и конец сварного шва, а подгружаемая схема генерирует внедряемые тела ЗС и ЗТВ.

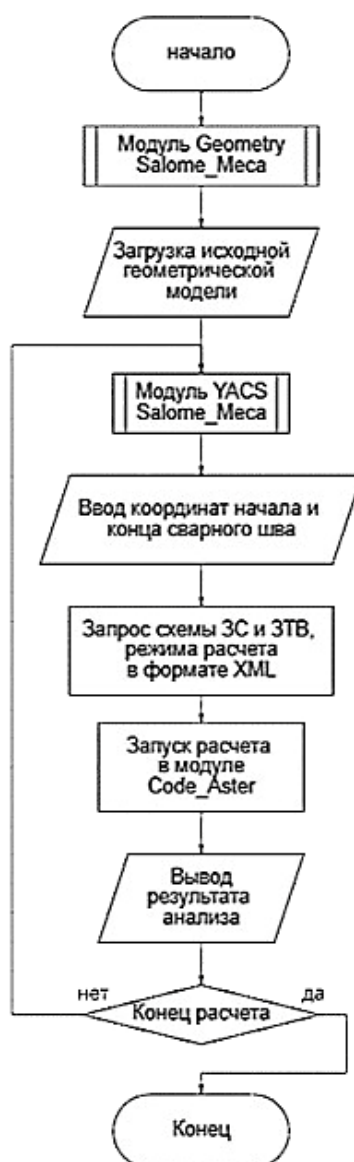


Рис. 6. Алгоритм автоматизации расчета НДС сварных конструкций в программной среде Salome

Fig. 6. Algorithm for automating the calculation of the SSS of welded structures in the Salome software environment

На рис. 7 показано внедрение ЗТВ и ЗС в промышленную деталь консоли. Главная задача на этом этапе состоит в получении слитой воедино геометрии нескольких тел и на ее основании – однородной расчетной сетки.

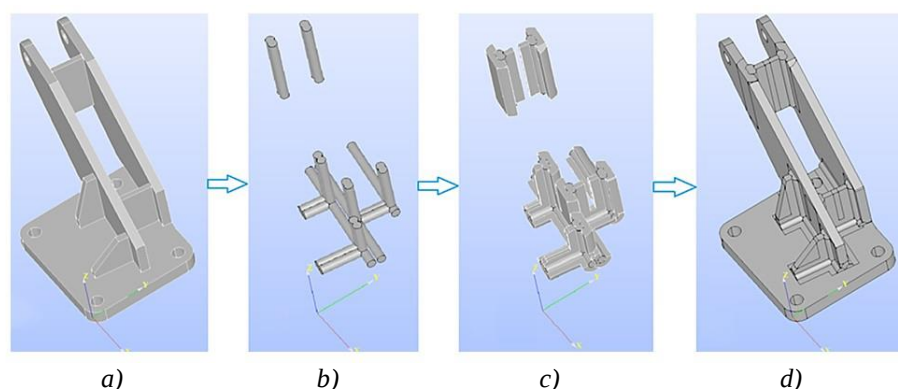


Рис. 7. Построение модели сварной конструкции консоли:

a) изначальная модель консоли; b) геометрические примитивы сварных швов (ЗС);
c) соединение геометрических примитивов ЗС и ЗТВ; d) готовая сборка консоли

Fig. 7. Construction of the model of welded cantilever structure:

a) initial model of the cantilever; b) geometric primitives of the welded seams (FZ);
c) connection of geometric primitives of the FZ and HAZ; d) finished assembly of the cantilever

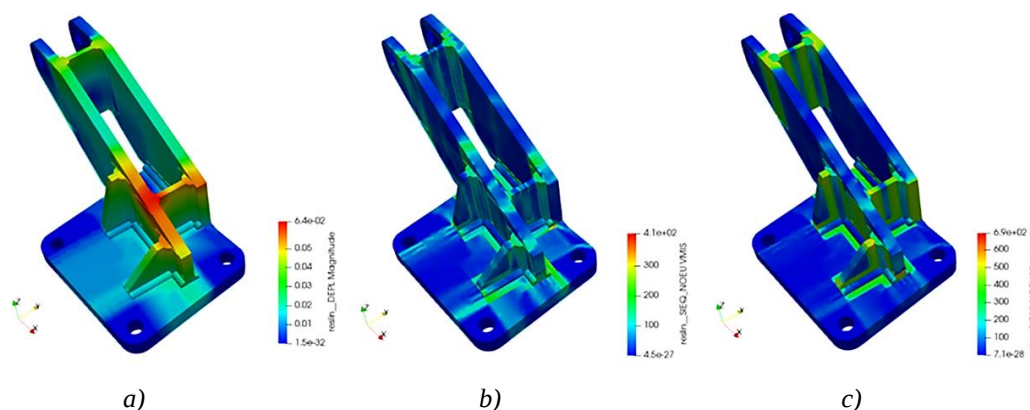


Рис. 8. Результаты статического расчета сварной конструкции консоли:

a) деформации, мм; b) напряжения по Мизесу, МПа; c) усредненные напряжения в узлах модели, МПа

Fig. 8. Results of the static calculation of welded cantilever structure:

a) deformations, mm; b) von Mises stresses, MPa; c) average nodal stresses, MPa

После внедрения геометрических тел модель должна вести себя как единое тело и воспроизводить после проведения расчета реальные остаточные явления после сварки. На рис. 8 продемонстрирован результат расчета напряжений промышленной детали консоли.

5. Перспективы перехода на параллельные архитектуры

Переход платформы Salome на параллельные архитектуры необходим для обработки сверхбольших моделей в современных инженерных расчетах. Основные перспективы и текущие возможности сосредоточены в следующих модулях: Mesh (генерация сеток) и ParaVis (визуализация).

Модуль Mesh может параллельно генерировать отдельные 3D-тела, раздельно используя NETGEN – многоплатформенный автоматический генератор сеток для систем конечно-элементного анализа (FEA).

Модуль ParaVis способен визуализировать большие данные (HPC-результаты) с помощью распределенной обработки, а именно используя возможности по клиент-серверной визуализации, что позволяет рендерить модели с миллионами элементов на удаленных кластерах. Модуль ParaVis адаптирован для работы в средах с распределенной памятью с помощью возможности графических процессоров (GPU) для ускорения отрисовки.

Кроме того, архитектура Salome основана на технологии CORBA, которая изначально проектировалась для взаимодействия компонентов в распределенных системах. Salome выступает в роли супервизора, координирующего работу внешних параллельных кодов (таких как *Code_Aster*) через интерфейсы MPI и MUMPS.

В статье [15], опубликованной в 2022 г., С. В. Медведев показал связь между вычислительными возможностями персонального компьютера и суперкомпьютерной грид-средой, а также перспективы развития суперкомпьютерной технологии прогнозирования остаточных явлений при дуговой сварке, увязанной с процессами автоматизированного проектирования сборочно-сварочной оснастки.

Заключение

Представленный силовой метод нахождения НДС сварных конструкций позволяет многократно сократить время проектирования сложных сварных узлов. При многократном увеличении сложности и протяженности сварных швов существует возможность использования суперкомпьютерных вычислений.

Главные направления развития и преимущества метода:

1. Снижение трудоемкости: переход от детального термомеханического моделирования каждого сварочного прохода к расчету приложения эквивалентных сил. Обеспечивает возможность выполнения статических расчетов сварных конструкций за минуты, а не за часы или дни.

2. Интеграция в САПР: упрощенные алгоритмы встраиваются в стандартные программные комплексы, позволяя инженерам-конструкторам оперативно оценивать технологичность узла на этапе чертежа.

3. Оптимизация сборочных процессов: быстрый расчет дает возможность инженерам легко подбирать оптимальную последовательность сварки или определять необходимый предварительный изгиб (припуск) для компенсации последующих сварочных деформаций.

4. Масштабируемость: упрощенные математические модели позволяют эффективно прогнозировать остаточные явления в крупногабаритных конструкциях (судостроение, мостостроение), где точное моделирование физических процессов затруднительно из-за колоссального объема вычислений.

В дальнейшем с помощью описанной выше технологии будут ставиться эксперименты на основе более сложных конфигураций промышленных сварных конструкций.

Список использованных источников

1. A new theory for lucid estimation of welding residual stress in plate joint / Y. Ueda, K. Fukuda, K. Nakacho, S. Endo // Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute). – 1975. – Vol. 4, no. 2. – P. 73–81.

2. Ueda, Y. Theory of thermal elastic-plastic analysis with special reference to predictive methods of welding residual stress and deformation / Y. Ueda, K. Nakacho // *Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute)*. – 1982. – Vol. 11, no. 2. – P. 95–103.
3. Окерблом, Н. О. Сварочные деформации и напряжения. Теория и ее применение / Н. О. Окерблом. – М.; Л. : Машгиз, 1948. – 252 с.
4. Okerblom, N. O. The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures / N. O. Okerblom. – London : H.M.S.O., 1958. – 234 p.
5. Николаев, Г. А. Расчет сварных соединений / Г. А. Николаев. – М. : Объединенное научно-техническое изд-во, 1933. – 132 с.
6. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
7. Окерблом, Н. О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке / Н. О. Окерблом. – М.; Л. : Машгиз, 1955. – 212 с.
8. Гатовский, К. М. Теория сварочных деформаций и напряжений : учеб. пособие / К. М. Гатовский, В. А. Кархин. – Л. : ЛКИ, 1980. – 331 с.
9. Медведев, С. В. Компьютерное моделирование остаточных сварочных деформаций при технологическом проектировании сварных конструкций / С. В. Медведев // *Сварочное производство*. – 2001. – № 8. – С. 10–18.
10. Medvedev, S. V. Computer modeling and residual welding strains in technological design of welded structures / S. V. Medvedev // *Welding International*. – 2002. – Vol. 16. – P. 59–65.
11. Жуковец, М. В. Автоматизация расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций общего назначения в программной среде Salome-Meca / М. В. Жуковец // *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*. – 2025. – Т. 3, № 1. – С. 21–28.
12. Медведев, С. В. Компьютерные технологии прогнозирования остаточных сварочных явлений при дуговой сварке конструкций общего назначения / С. В. Медведев, М. В. Жуковец // *Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности : сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации ; Бел.-Рос. ун-т ; Бел. нац. техн. ун-т ; С.-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого ; Объед. ин-т проблем информатики НАН Беларуси ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2022. – С. 159–163.*
13. Куркин, А. С. Сварные конструкции. Расчет и проектирование : учеб. для ВУЗов / А. С. Куркин, В. Ф. Лукьянов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 264 с.
14. Трочун, И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке / И. П. Трочун. – М. : Машгиз, 1964. – 247 с.
15. Медведев, С. В. Конструктивно-технологическое проектирование и моделирование сварных конструкций в распределенных суперкомпьютерных средах / С. В. Медведев // *Сварочное производство*. – 2022. – № 5. – С. 24–29.

References

1. Ueda Y., Fukuda K., Nakacho K., Endo S. A new theory for lucid estimation of welding residual stress in plate joint. *Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute)*, 1975, vol. 4, no. 2, pp. 73–81.
2. Ueda Y., Nakacho K. Theory of thermal elastic-plastic analysis with special reference to predictive methods of welding residual stress and deformation. *Transactions of JWRI (Joining and Welding Research Institute)*, 1982, vol. 11, no. 2, pp. 95–103.

3. Okerblom N. O. Svarochnye deformatsii i napryazheniya. Teoriya i ee primeneniye. *Welding Deformations and Stresses. Theory and Its Application*. Moscow, Leningrad, Mashgiz, 1948, 252 p. (In Russ.).
4. Okerblom N. O. *The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures*. London, H.M.S.O., 1958, 234 p.
5. Nikolaev G. A. Raschet svarnykh soedineniy. *Calculation of Welded Joints*. Moscow, Ob"edinennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo, 1933, 132 p. (In Russ.).
6. Rykalin N. N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke. *Calculations of Thermal Processes in Welding*. Moscow, Mashgiz, 1951, 296 p. (In Russ.).
7. Okerblom N. O. Raschet deformatsiy metallokonstruktsiy pri svarke. *Calculation of Deformations of Metal Structures in Welding*. Moscow, Leningrad, Mashgiz, 1955, 212 p. (In Russ.).
8. Gatovskiy K. M., Karkhin V. A. Teoriya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy. *Theory of Welding Deformations and Stresses*. Leningrad, Leningradskij korablestroitel'nyj institut, 1980, 331 p. (In Russ.).
9. Medvedev S. V. *Computer simulation of residual welding deformations in technological design of welded structures*. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production], 2001, no. 8, pp. 10–18 (In Russ.).
10. Medvedev S. V. Computer modeling and residual welding strains in technological design of welded structures. *Welding International*, 2002, vol. 16, pp. 59–65.
11. Zhukovets M. V. *Automation in calculating stress-strain state of general-purpose welded structures in salome-meca software environment*. Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Promyshlennaya kibernetika [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics], 2025, vol. 3, no. 1, pp. 21–28 (In Russ.).
12. Medvedev S. V., Zhukovets M. V. *Computer technologies for predicting residual welding phenomena in arc welding of general-purpose structures*. Aktualnye voprosy i peredovye tekhnologii svarki v nauke i promyshlennosti: sbornik statej I Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Topical Issues and Advanced Welding Technologies in Science and Industry: Collection of Articles of the I International Scientific and Technical Conference]. Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii, Belorussko-Rossijskij universitet, Belorusskij nacional'nyj tehnikeskij universitet, Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet Petra Velikogo, Ob"edinennyy institut problem informatiki Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Lustenkov M. E. (ed.-in-ch.), Bodjako A. M., Denisov L. S., Kobernik N. V., Korobov Ju. S., Koroteev A. O., ..., Sasnovskij S. P. (eds.). Mogilev, Belorussko-Rossijskij universitet, 2022, pp. 159–163 (In Russ.).
13. Kurkin A. S., Lukyanov V. F. Svarnye konstruktsii. Raschet i proektirovanie. *Welded Structures. Calculation and Design*. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. N. Ye. Bauman, 2021, 264 p. (In Russ.).
14. Trochun I. P. Vnutrennie usiliya i deformatsii pri svarke. *Internal Forces and Deformations in Welding*. Moscow, Mashgiz, 1964, 247 p. (In Russ.).
15. Medvedev S. V. *Structural-technological design and simulation of welded structures in distributed supercomputer environments*. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production], 2022, no. 5, pp. 24–29 (In Russ.).

Информация об авторе

Михаил Владимирович Жуковец, инженер-программист 1-й категории лаборатории высокопроизводительных систем и технологий моделирования, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru

Information about the author

Mikhail V. Zhukavets, Mid-level Software Engineer, Laboratory of High-Performance Systems and Modeling Technologies, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: mikhail.zhukavets@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.832.519.6

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-62-75>

Поступила в редакцию | Received 14.05.2026

Подписана в печать | Accepted 04.06.2026

Опубликована | Published 30.09.2026

Постквантовое шифрование на основе хаотической системы и принципа кубика Рубика

А. В. Сидоренко✉, И. В. Сергеев✉E-mail: sidorenkoa@yandex.by*Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целями исследования являются разработка и экспериментальная проверка гибридного алгоритма постквантового шифрования изображений, основанного на 3D-хаотической системе и принципе кубика Рубика.

Методы. Рассмотрены вопросы устойчивости традиционных методов шифрования к атакам с использованием квантовых компьютеров. Для создания криптографически стойкого алгоритма предложено объединить преимущества хаотических систем и квантовых вычислений. Использована новая 3D-хаотическая система на базе модифицированной системы Лоренца для генерации псевдослучайных ключей. Применен принцип кубика Рубика для осуществления операций скремблирования (циклического сдвига строк и столбцов) изображения. Для квантового представления и обработки данных использована модель NEQR (Novel Enhanced Quantum Representation). Реализация алгоритма выполнена на языке Python с применением библиотек Quiskit, OpenCV и NumPy, а также симулятора квантовых вычислений AerSimulator.

Результаты. Разработан гибридный алгоритм шифрования, реализованный в виде компьютерной программы. Алгоритм протестирован на изображениях различного размера и формата. Экспериментально подтверждена устойчивость алгоритма к статистическим и дифференциальным атакам: коэффициент корреляции соседних пикселей зашифрованных изображений близок к нулю, информационная энтропия – к идеальному значению восемь, а значения NPCR (Number of Pixels Change Rate) и PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) превышают 99,25 % и составляют менее 13 дБ соответственно.

Заключение. Предложенный гибридный алгоритм демонстрирует высокую криптографическую стойкость и эффективность. Чувствительность к ключам, использование квантовых принципов и оптимизация производительности за счет многопоточности делают его практичным для применения в сферах, критичных к безопасности, таких как IoT, телемедицина и облачные хранилища. Программная реализация работает локально, не требуя подключения к интернету, что обеспечивает безопасность данных.

Ключевые слова: постквантовое шифрование, изображения, хаотические системы, принцип кубика Рубика, квантовые вычисления, модель NEQR, библиотека Qiskit

Для цитирования. Сидоренко, А. В. Постквантовое шифрование на основе хаотической системы и принципа кубика Рубика / А. В. Сидоренко, И. В. Сергеев // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 3. – С. 62–75. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-62-75>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Post-quantum image encryption based on a chaotic system and the Rubik's cube principle

Alevtina V. Sidorenko✉, Igor V. Sergeev

✉E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Belarusian State University,
av. Nezavisimosti, 4, Minsk, 220030, Belarus

Abstract

Objectives. The aim of the work is the development and experimental verification of a hybrid post-quantum image encryption algorithm based on a 3D chaotic system and the Rubik's cube principle.

Methods. Issues of the vulnerability of traditional encryption methods to attacks using quantum computers are considered. To create a cryptographically robust algorithm, it is proposed to combine the advantages of chaotic systems and quantum computing. A new 3D chaotic system based on a modified Lorenz system is used for generating pseudorandom keys. The Rubik's cube principle is applied to perform image scrambling operations (cyclic shifting of rows and columns). The NEQR (Novel Enhanced Quantum Representation) model is used for quantum representation and data processing. The algorithm is implemented in Python using the Quiskit, OpenCV, and NumPy libraries, as well as the AerSimulator quantum computing simulator.

Results. A hybrid encryption algorithm has been developed and implemented as a computer program. The algorithm was tested on images of various sizes and formats. Resistance to statistical and differential attacks has been experimentally confirmed: the correlation coefficient of adjacent pixels in the encrypted images is close to zero, the information entropy is close to the ideal value of 8, and the NPCR and PSNR values exceed 99,25 % and are less than 13 dB, respectively.

Conclusion. The proposed hybrid algorithm demonstrates high cryptographic strength and efficiency. Key sensitivity, the use of quantum principles, and performance optimization through multithreading make it practical for use in security-critical areas such as IoT, telemedicine, and cloud storage. The software implementation operates locally without requiring an internet connection, which ensures data security.

Keywords: post-quantum encryption, images, chaotic systems, Rubik's cube principle, quantum computing, NEQR model, Qiskit library

For citation. Sidorenko A. V., Sergeev I. V. *Post-quantum image encryption based on a chaotic system and the Rubik's cube principle*. *Informatika [Informatics]*, 2026, vol. 23, no. 3, pp. 62–75 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-62-75>.

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

Введение

Развитие квантовых вычислений и компьютеров создает беспрецедентную угрозу для современных методов защиты передаваемых данных (информации). Государственная, профессиональная и коммерческая тайны, финансовые и персональные данные – все это перестает быть конфиденциальным, как только злоумышленник получает доступ к мощным квантовым компьютерам. Современные квантовые компьютеры пока не обладают мощностью, достаточной для взлома системы на основе традиционных методов шифрования. С появлением квантовых вычислительных систем возникает необходи-

мость перехода к новым методам криптографии, способным обеспечить надежную защиту в квантовую эпоху [1, 2]. При шифровании же изображений, для которых характерна обработка большого объема графических данных, возникает необходимость перехода к новым методам защиты информации, так как существующие традиционные методы типа RSA (асимметричный алгоритм шифрования) и ECC (криптография на эллиптических кривых) не обладают соответствующими свойствами. Переход на квантовую криптографию связан с необходимостью обновления оборудования, программного обеспечения и обучения специалистов. При использовании же постквантового шифрования, представляющего собой семейство криптографических алгоритмов, устойчивых к атакам со стороны как классических, так и квантовых компьютеров, возникает серьезная проблема совместимости.

Одним из перспективных инновационных направлений является применение хаотических систем для генерации псевдослучайных ключей и осуществления процедур перемешивания и диффузии данных. Хаотические отображения, такие как отображение кота Арнольда, отображение Хенона и логистическое отображение, уже давно доказали свою совместимость при защите информации благодаря чувствительности к начальным условиям и способности кардинально менять структуру исходных данных даже при незначительных изменениях информационных параметров [3–5].

В данной работе предлагается объединить преимущества квантовой криптографии и хаотических алгоритмов, используя квантовую модель представления изображений и принцип кубика Рубика для реализации эффективного гибридного алгоритма шифрования. Ее целями являются разработка и экспериментальная проверка гибридного алгоритма квантового шифрования изображений, основанного на 3D-хаотической системе (алгоритме) и принципе кубика Рубика.

===== Алгоритм на основе новой 3D-хаотической системы и принципа кубика Рубика.

Принцип кубика Рубика

Современные методы защиты информации все чаще используют идеи из смежных областей, включая динамические системы и комбинаторную математику.

Кубик Рубика представляет собой пластмассовый куб (форм-фактор в первоначальном варианте $3 \times 3 \times 3$). Его видимые элементы снаружи выглядят как 54 грани малых кубиков, составляющих один большой куб и способных вращаться вокруг трех внутренних осей куба. Поворачивая строки и столбцы кубика, можно осуществлять циклический сдвиг строк и столбцов. Основываясь на этом, шифрование изображения может быть достигнуто путем циклического перемешивания строк и столбцов в процессе шифрования. Принцип кубика Рубика показан на рис. 1. Циклический перевод строки осуществляется следующим образом. При выполнении циклического сдвига вправо на одну единицу значения в этой строке изменяются от 147 до 714 (рис. 1, *a, b*). Аналогично при выполнении циклического сдвига вправо на две единицы во втором ряду (рис. 1, *a, b*) значения в этом ряду изменяются от 258 до 582. Циклический сдвиг столбцов заключается в том, что при сдвиге вниз на единицу первого столбца (рис. 1, *b, c*) значения в этом столбце изменяются от 753 до 375. Аналогично при циклическом сдвиге на две единицы (рис. 1, *b*) значения в этом столбце изменяются от 186 до 861 (рис. 1, *b, c*) [6].

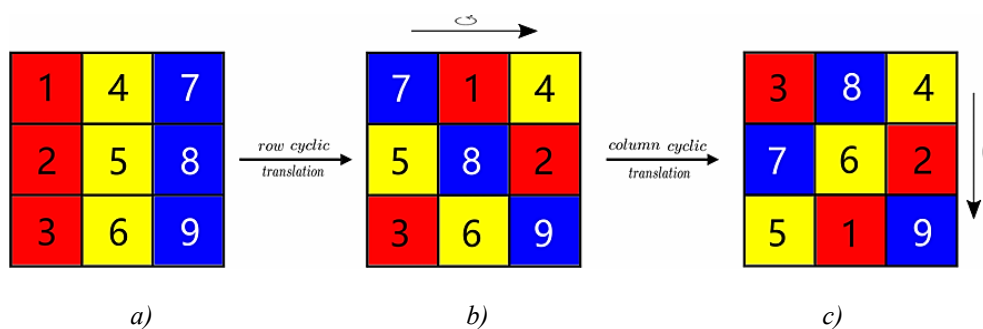


Рис. 1. Принцип кубика Рубика

Fig. 1. Rubik's cube principle

Группы пикселей изображения могут рассматриваться как блоки, где каждый из элементов изображения и каждый поворот грани представляет собой линейное или нелинейное преобразование вектора состояния блока. С математической точки зрения поворот грани аналогичен применению матрицы перестановки к множеству векторов, описывающих значения составляющих интенсивностей цвета RGB (R – red (красный), G – green (зеленый), B – blue (голубой)):

$$P' = M \cdot P, \quad (1)$$

где P – исходный набор пикселей, M – матрица поворота грани, P' – результат трансформации.

За счет рекурсивных итеративных перестановок в криптографии принцип кубика Рубика позволяет достигать высокой степени спутанности и рассеивания информации. Спутанность при этом достигается за счет частых перестановок пикселей между блоками, а рассеивание – за счет воздействия на значения цветовых компонентов (в частности, путем побитовой операции XOR с псевдослучайными последовательностями).

Важную роль играют хаотические отображения, применяемые в процессе управления поворотами, например отображение кота Арнольда, логистическое отображение, которые представлены выражениями

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 \\ 12 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N, \quad (2)$$

где x, y – координаты пикселя, N – размер изображения, и

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n), x_n \in (0,1), r \in [3,57,4], \quad (3)$$

где x_n – текущее значение координаты x в двумерном пространстве, r – динамический коэффициент хаоса [6].

Многократное применение выбранного отображения обеспечивает равномерную перестановку пикселей.

Новая 3D-хаотическая система, предложенная для разработки алгоритма

В настоящей работе используется модификация системы Лоренца, выраженная в добавлении нелинейного члена и корреляционных параметров рассматриваемых последовательностей с целью получения новой хаотической системы [7].

Дополнительные нелинейные члены усиливают хаотическое поведение системы, а также дают более высокие значения экспоненты Ляпунова, что делает систему более подходящей для шифрования. Математическую модель аттрактора хаотической системы получаем путем введения параметров a , b , c , d . Математически отображение Лоренца записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ay - bxz, \\ \frac{dy}{dt} = -x + cyz, \\ \frac{dz}{dt} = 1 - dy^2. \end{cases} \quad (4)$$

В данной хаотической системе начальное состояние (x_0, y_0, z_0) выбрано $(1, 0, 1; 0; 0)$, параметры выбраны $a = 1$, $b = 0,6$, $c = 47$, $d = 0,5$. Фазовый портрет хаотической системы демонстрирует сложную трехмерную двукрылую структуру с замысловатыми траекториями растяжения и сложения. На рис. 2 изображена фазовая диаграмма предложенной хаотической системы.

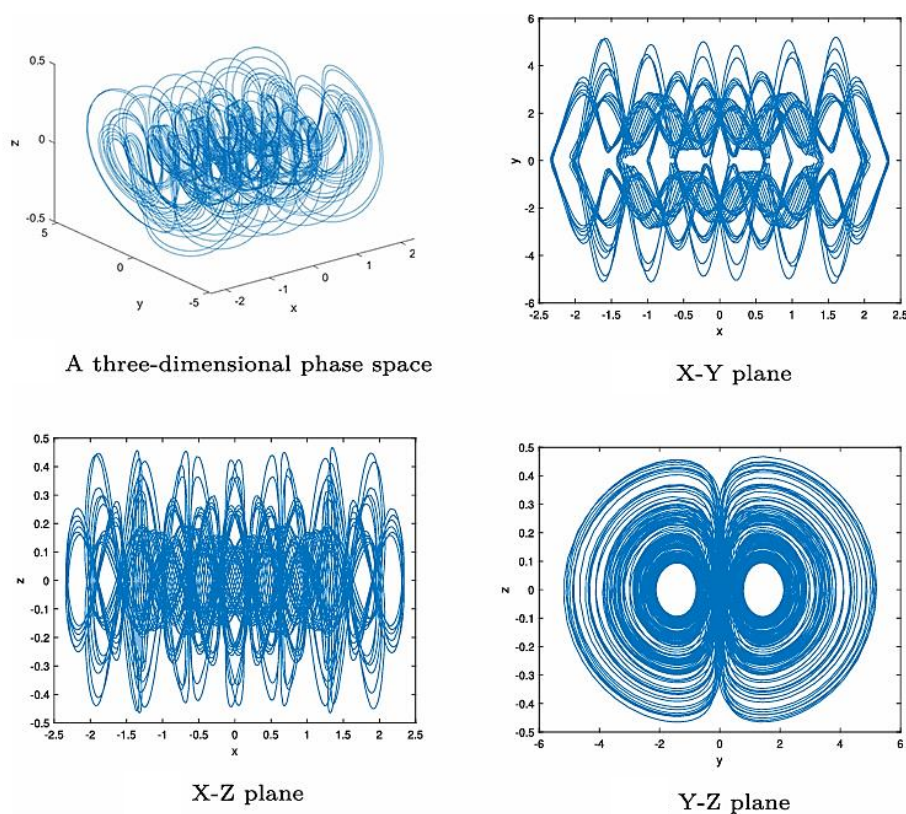


Рис. 2. Фазовая диаграмма 3D-хаотической системы

Fig. 2. Phase Diagram of the 3D-Chaotic System

Предложенная хаотическая система с использованием принципа кубика Рубика

Рассмотрим некоторые аспекты дополнительных сведений, необходимых при разработке алгоритма. Используем изображение размером $M \times N$ в диапазоне серого 2^q . В соответствии с исходным значением ключа (x_1, y_1, z_1) итерируем хаотическую систему (определим, сколько раз был выполнен полный раунд шифрования) $3000 + M \times N$ раз, чтобы получить три хаотические последовательности X_1, Y_1, Z_1 :

$$\begin{cases} X_1 = X(3 = 3001: 3001 + M), \\ Y_1 = Y(3001: 3001 + N), \\ Z_1 = Z(3001: 3001 + M \times N). \end{cases} \quad (5)$$

Для достижения лучшей рандомизации первые 3000 значений отбрасываются. Затем полученные хаотические последовательности преобразуются в псевдослучайные с помощью операции модуляции

$$\begin{cases} K_r = \text{mod}(\text{round}(X_1 * 10^4), M - 1) + 1, \\ K_c = \text{mod}(\text{round}(Y_1 * 10^4), N - 1) + 1, \\ K_r = \text{mod}(\text{round}(Z_1 * 10^4), 2^q), \end{cases} \quad (6)$$

где mod обозначает операцию модуляции *Modulus Operation*, описанную в работе [7].

Метод генерации квантового образа ключа

Следует отметить, что рассматриваемый гибридный алгоритм квантового шифрования изображений является постквантовым, а постквантовое шифрование изображения поддерживается целым рядом библиотек, которые лежат в основе других продуктов – от почтовых до веб-серверов и операционных систем. Это позволило при разработке алгоритма использовать модель NEQR, которая является способом представления изображений в квантовых компьютерах для более эффективного хранения и обработки цифровых изображений в квантовом формате. Модель использует ортогональные квантовые состояния для хранения информации о положении пикселя и градациях серого, т. е. информация об изображении может быть точно извлечена. Для получения полутонового изображения $2^n \times 2^n$ в диапазоне серого $[0, 2^q - 1]$ согласно модели NEQR требуется всего $2n + q$ кубитов, где последовательность из $2n$ -кубитов представляет положение пикселей изображения, а последовательность из q кубитов – положение для каждого пикселя [8].

Последовательности ключей (K_r, K_c, K_{xor}) преобразуются в квантовые состояния с помощью модели NEQR. Запишем квантовое представление в виде уравнения

$$\begin{cases} K_r \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{Y_t=0}^{2^n-1} |K_r(Y_t)\rangle \otimes |Y_t\rangle, \\ K_c \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{X_t=0}^{2^n-1} |K_c(X_t)\rangle \otimes |X_t\rangle, \\ K_{xor} \rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{Y_k=0}^{2^n-1} \sum_{X_k=0}^{2^n-1} |K_{xor}(Y_k X_k)\rangle \otimes |Y_k\rangle |X_k\rangle, \end{cases} \quad (7)$$

где $|Y_t\rangle, |X_t\rangle$ – информация о положении ключевого потока; $K_r(Y_t), K_c(X_t)$ – значения, полученные при циклическом сдвиге; K_{xor} – значение для выполнения операции XOR.

Формируется ключевое изображение того же размера, что и скремблированное. Это используется для достижения эффекта диффузии [8].

===== Принцип кубика Рубика в квантовом изображении

Принцип скремблирования кубика Рубика заключается в достижении эффекта скремблирования путем аналогии игрушки кубик Рубика и циклического перемещения строк и столбцов изображения. В квантовых изображениях достигается эффект циклического сдвига при выполнении модульного сложения над координатными позициями квантового изображения. Для усиления эффекта скремблирования циклический сдвиг строк изображения влево (вправо) и циклический перевод столбцов вверх (вниз) определяются на основе четности значения ключа. Операция циклического сдвига изображения может быть разложена на две разделяемые части: направление X и направление Y . В качестве примера операции циклического сдвига рассмотрим направление X .

При $x \geq K_c$ получаем, что $0 \leq x, K_c \leq 2^n - 1$. Следовательно, выполняется соотношение $0 \leq x - K_c \leq 2^n - 1$ и можно сделать вывод, что $(x - K_c) \cdot \text{mod } 2^n = b - a$. При $x < K_c$ можно сделать вывод, что $x < K_c \Rightarrow 1 - 2^n \leq x - K_c \leq -1 \Rightarrow 1 \leq 2^n + (b - a) \leq 2^n - 1$. Здесь a и b представляют собой вводимые согласно модели NEQR параметры. Таким образом, выполняется соотношение $(b - a) \text{ mod } 2^n = 2^n + (b - a)$. В связи с этим квантовый вычитатель является квантовым вычитателем по модулю 2^n [9].

Для циклического сдвига строки:

– сдвиг вправо

$$|x, y\rangle \rightarrow |(x + K_r(i)) \text{ mod } 2^n, y\rangle, \quad (8)$$

– сдвиг влево

$$|x, y\rangle \rightarrow |(x + K_r(j)), y\rangle. \quad (9)$$

Для циклического сдвига столбца:

– сдвиг вниз

$$|x, y\rangle \rightarrow |(x, (y + K_c(j)) \text{ mod } 2^n), \quad (10)$$

– сдвиг вверх

$$|x, y\rangle \rightarrow (y + K_c(j)). \quad (11)$$

===== Гибридный алгоритм квантового шифрования изображений

Алгоритм шифрования состоит из нескольких этапов. Прежде чем перейти к описанию алгоритма, остановимся на двух моментах.

Для квантового изображения размером $2^n \times 2^n$ выражение I_0 , основанное на модели NEQR, в случае черно-белого изображения имеет вид

$$I_0 = \frac{1}{2^n} \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} C_{YX} \vee YX = \frac{1}{2^n} \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} \bigotimes_{i=0}^7 V C_{YX}^i \vee YX, \quad (12)$$

где $C_{YX} = C_{YX}^7 C_{YX}^6 \dots C_{YX}^0$, $C_{YX}^i \in \{0, 1\}$.

В рассматриваемом алгоритме оригинальный исходный ключ и ключ изображения представлены с использованием модели NEQR [9].

При описании алгоритма вводится элемент $ITER$, который представляет собой счетчик итераций, т. е. переменную, которая отслеживает, сколько раз был выполнен один полный раунд шифрования.

Гибридный алгоритм шифрования сводится к следующему:

1. Установить количество скремблирований $ITER_{max}$ и инициализировать $ITER$ на 0: $ITER = 0$.

2. Увеличить счетчик $ITER$ на единицу: $ITER = ITER + 1$.

3. Циклически сдвинуть строку i квантового изображения I_0 . Если значение $K_r(i)$ нечетное, то с помощью модуля $CT(+)$ циклически перевести строку j влево на позицию $K_r(i)$. В противном случае используется модуль $CT(-)$, чтобы циклически перевести изображение в i -м ряду вправо на позицию $K_r(i)$:

$$\langle I_1 \rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} \langle C_{YX} \rangle |X \pm K_r(i) \rangle \bmod 2^n. \quad (13)$$

4. Циклически сдвинуть столбец j квантового изображения I_0 . Если значение $K_c(j)$ нечетное, то с помощью модуля $CT(+)$ циклически сдвинуть строку j в позицию вверх на $K_c(j)$. В противном случае используется модуль CT для циклического сдвига изображения в строке j в позиции вниз на $K_c(j)$:

$$\langle I_{scr} \rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} \langle C_{YX} \rangle |X \pm K_c(j) \rangle \bmod 2^n \vee X. \quad (14)$$

Повторив вышеописанные операции, получаем квантовый образ I_{scr} , построенный по принципу кубика Рубика.

5. Выполнить побитовую операцию XOR между скремблированным изображением I_{scr} и ключевым изображением K_{xv} :

$$\begin{aligned} I_{enc} &= I_{scr} \otimes \vee K_{xv} = \\ &= \frac{1}{2^n} \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} \langle C_{YX} \rangle \bmod 2^n |YX\rangle \otimes \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} \langle K_{xor}(Y_k X_k) \rangle \vee Y_k X_k = \\ &= \frac{1}{2^n} \sum_{Y=0}^{2^n-1} \sum_{X=0}^{2^n-1} \otimes_{i=0}^{q-1} \vee C_{YX}^i \otimes k_{xor}^i(YX) \vee YX. \end{aligned} \quad (15)$$

6. Процесс шифрования полностью выполняется до тех пор, пока значение $ITER$ не достигнет значения $ITER_{max}$. В противном случае алгоритм переходит к шагу 2.

Поскольку квантовые системы обратимы, процесс дешифрования в такой схеме является обратным процессу шифрования, поэтому не будет описываться дополнительно.

Программная реализация алгоритма на основе хаотической системы и принципа кубика Рубика

В данной работе реализация предложенного алгоритма в виде компьютерной программы проведена следующим образом:

1. Разработана программная реализация алгоритма квантового шифрования изображений, основанная на предложенной новой хаотической системе и принципе кубика Рубика, обеспечивающая устойчивость к атакам и высокую степень запутанности данных.

2. Оптимизирован алгоритм обработки изображений с использованием многопоточности, что позволило сократить общее время выполнения процесса шифрования и повысить производительность системы.

3. Созданы квантовые схемы с применением библиотеки Qiskit для представления изображения, осуществления операций трансляции и диффузии, а также моделирования проведения квантовых вычислений на симуляторе AerSimulator.

4. Проведено тестирование корректности работы алгоритма, визуального анализа результатов и сравнения зашифрованных изображений с целью подтверждения соответствия полученной реализации требованиям безопасности и эффективности.

Для реализации алгоритма шифрования с применением языка программирования Python использовались следующие библиотеки:

```
import numpy as np,  
import cv2,  
from qiskit import QuantumCircuit, QuantumRegister, ClassicalRegister, transpile,  
from qiskit_aer import AerSimulator,  
from math import ceil, log2,  
import concurrent.futures,  
import os.
```

При разработке компьютерной программы авторы использовали следующую конкретизацию:

- `numpy (np)` – библиотека для работы с массивами, создания ключей и хранения значений изображения.
- `cv2 (OpenCV)` – библиотека для работы с изображениями. Применяется для чтения изображения и преобразования его в нужные форматы.
- `Qiskit` – библиотека для создания квантовых схем.

В коде используются `QuantumCircuit`, `QuantumRegister`, `ClassicalRegister` (создание и работа с квантовыми и классическими регистрами) и `transpile` (преобразование схемы в оптимизированную форму для симуляции или выполнения на реальном квантовом компьютере).

- `AerSimulator` – симулятор квантовых схем от Qiskit.
- `math` – функция для математических вычислений (`ceil`, `log2`).
- `concurrent.futures` – обработка блоков изображения параллельно с помощью многопоточности.
- `os` – число процессоров при многопоточности.

Следует более подробно остановиться на библиотеке Qiskit, разработанной компанией IBM и представляющей собой открытый программный фреймворк для разработки, моделирования и выполнения квантовых алгоритмов. В основе Qiskit лежит модульная архитектура, где каждый компонент отвечает за определенный аспект квантовых вычислений. Базовый модуль Terra обеспечивает функционал для построения и оптимизации квантовых схем, включая их трансляцию в аппаратно-зависимые инструкции. Модуль Aer выступает в роли высокопроизводительного симулятора, который позволяет тестировать алгоритмы в условиях, приближенных к реальным квантовым процессорам, включая моделирование различных видов шумов. Сервис Runtime предназначен для эф-

фективного выполнения квантовых программ непосредственно на физических процессорах IBM¹. В контексте данного исследования Qiskit была использована как платформа для моделирования и анализа предложенного алгоритма квантового шифрования изображений.

Для определения работоспособности и надежности работы алгоритма проведено тестирование разработанной компьютерной программы на черно-белых и цветных изображениях, имеющих различные размеры. В качестве тестируемых использованы изображения: Babbon.png размером 512×512 пикселей в черно-белом формате, HorizonZero.png размером 250×250 пикселей, Peppers.png размером 435×435 пикселей и Lena.png размером 800×800 пикселей в цветном формате. Как пример рассмотрим тестовое изображение Lena.png размером 800×800 пикселей в цветном формате (рис. 3).

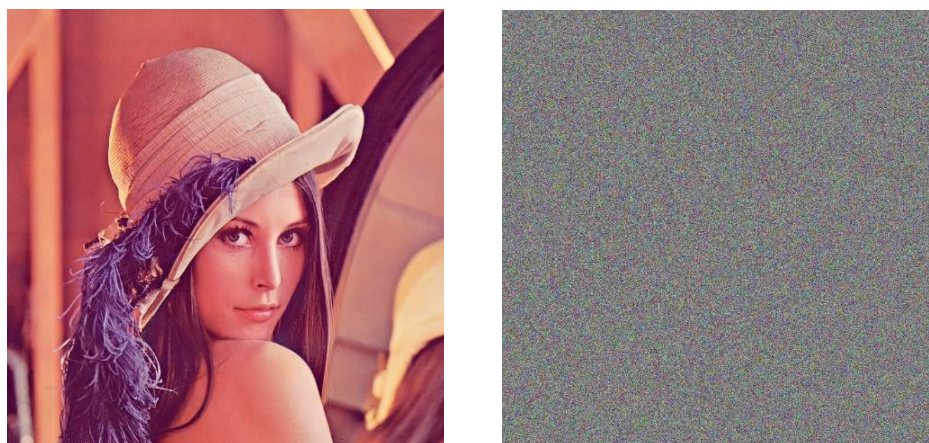


Рис. 3. Оригинальное и зашифрованное изображения Lena.png

Fig. 3. The original and encrypted Lena.png image

На рис. 4 представлены гистограммы интенсивностей цветов оригинального и зашифрованного изображений Lena.png разрешением 800×800 пикселей.

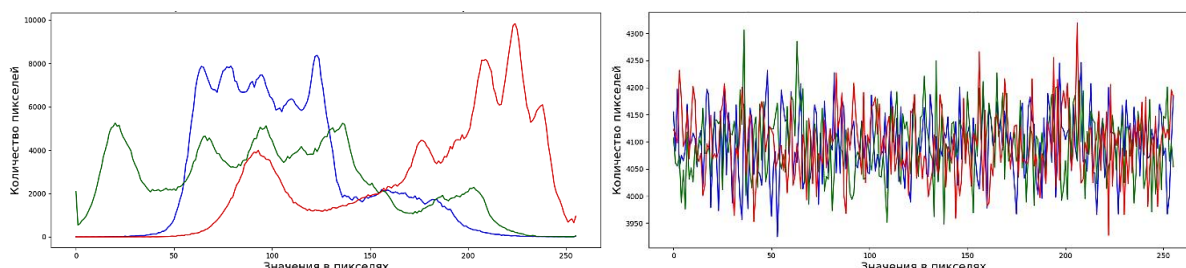


Рис. 4. Гистограммы интенсивностей цветов оригинального и зашифрованного изображений Lena.png

Fig. 4. Color intensity histograms of the original and encrypted Lena.png image

¹IBN. Accurate Your Development with Qiskit functions. – URL: <https://www.ibm.com/quantum> (date of access: 18.04.2025).

Проведенный анализ графиков корреляции соседних пикселей оригинальных и зашифрованных изображений (рис. 5) позволил сделать вывод, что при использовании исследуемого алгоритма коэффициент корреляции соседних пикселей близок к нулю. Это усложняет прослеживание закономерностей пикселей.

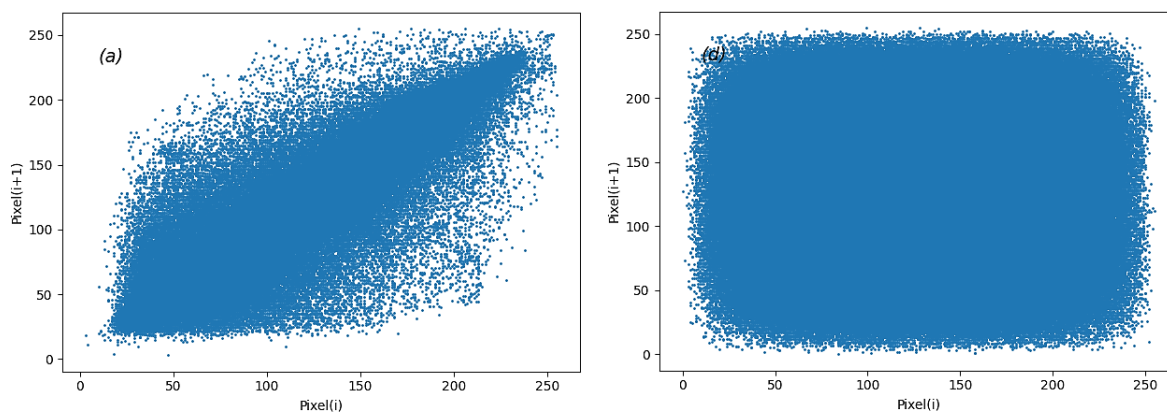


Рис. 5. Корреляция пикселей оригинального и зашифрованного изображений Lena.png

Fig. 5. Pixel correlation of the original and encrypted Lena.png image

Коэффициенты корреляции соседних пикселей, рассчитанных в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях, для тестируемых и зашифрованных изображений приведены в таблице.

Коэффициенты корреляции оригинальных и зашифрованных изображений

Correlation coefficients of the original and encrypted images

Изображение <i>Image</i>	Направление <i>Direction</i>		
	горизонтальное <i>horizontal</i>	вертикальное <i>vertical</i>	диагональное <i>diagonal</i>
Baboon оригинальное	0,86345	0,75419	0,72183
Baboon зашифрованное	−0,0020	−0,00142	−0,00142
HorizonZero оригинальное	0,93121	0,93767	0,88818
HorizonZero зашифрованное	0,00481	−0,00559	−0,00220
Lena оригинальное	0,96355	0,97867	0,95300
Lena зашифрованное	0,00095	−0,0030	−0,00120
Peppers оригинальное	0,98971	0,99241	0,98167
Peppers зашифрованное	0,00132	0,00377	0,00399

Как видно из таблицы, для исходных изображений коэффициент корреляции соседних пикселей в трех направлениях близок к единице, а у зашифрованных – к нулю. Это указывает на то, что злоумышленник не может получить статистической информации из гистограмм зашифрованного изображения. Поэтому основанный на анализе гистограмм алгоритм может рассматриваться как устойчивый к статистическим атакам.

Проведенный энтропийный анализ показал, что рассматриваемый алгоритм является устойчивым к атакам, так как информационная энтропия зашифрованного изображения близка к идеальной величине, равной восьми.

Как показал анализ, значения параметров NPCR и PSNR превышают 99,25 % (в первом случае) и ниже 13 дБ (во втором случае). Коэффициент NPCR является общим показателем для оценки качества сжатия, передачи и восстановления изображений. Коэффициент PSNR используется в качестве инструмента для оценки устойчивости к дифференциальной атаке, измеряющей чувствительность пикселей схемы шифрования.

Таким образом, тестирование разработанной компьютерной программы показало наличие стойкости к статистическим и дифференциальным атакам. Предложенный алгоритм эффективен и может быть использован в практических задачах защиты изображений, особенно в сферах, критичных к безопасности, таких как IoT и телемедицина.

Заключение

В работе рассматривается гибридный алгоритм квантового шифрования изображений, основанный на 3D-хаотической системе и принципе кубика Рубика. Описаны ключевые принципы квантовых вычислений, хаотических систем и современных криптографических алгоритмов, что позволило обосновать гибридный подход, объединяющий преимущества квантовой и хаотической криптографии.

Рассмотрены основные принципы квантовой криптографии, включая квантовую суперпозицию и запутывание; проанализированы хаотические системы Лоренца, Хенона, кота Арнольда и их применение для генерации псевдослучайных последовательностей при шифровании. Разработана новая 3D-хаотическая система с улучшенными криптографическими свойствами, связанными с высокой чувствительностью к начальным условиям и сложной фазовой динамикой.

Предложен алгоритм шифрования, сочетающий циклическую трансляцию пикселей (аналогично механике кубика Рубика) и диффузию на основе квантовых операций (СХ-гейты). Использована и реализована модель NEQR для кодирования изображений в квантовых системах, обеспечивающая точное восстановление данных. Оптимизирована обработка изображений за счет выполнения операций с применением многопоточности.

Программная реализация алгоритма выполнена на языке Python с использованием библиотек Quiskit, OpenCV и NumPy. Алгоритм поддерживает шифрование изображений произвольного размера с приведением к степени двойки. Проведено тестирование на изображениях различного разрешения (Babbon.png размером 512×512 пикселей в черно-белом формате, HorizonZero.png размером 250×250 пикселей, Peppers.png размером 435×435 пикселей и Lena.png размером 800×800 пикселей в цветном формате), которое подтвердило устойчивость алгоритма к статистическим и дифференциальным атакам. Визуальный и гистограммный анализ показал равномерное распределение пикселей в зашифрованных изображениях, а также отсутствие корреляции между соседними пикселями.

Разработанный алгоритм демонстрирует три ключевых свойства, обеспечивающих практическую ценность и безопасность. Во-первых, он обладает исключительной чув-

ствительностью к ключам: даже минимальные изменения начальных параметров хаотической системы приводят к принципиально разным результатам шифрования, что существенно затрудняет подбор ключей методом перебора. Во-вторых, алгоритм обеспечивает надежную защиту от потенциальных атак с использованием квантовых компьютеров. В-третьих, несмотря на вычислительную сложность квантовых операций, применение оптимизационных подходов, включая блочную обработку данных и многопоточные вычисления, позволило достичь приемлемого уровня производительности, что делает алгоритм пригодным для практического использования. Указанные свойства в совокупности обеспечивают уникальное сочетание криптографической стойкости и работоспособности в реальных условиях.

Вклад авторов. *А. В. Сидоренко* осуществила сбор, анализ и оформление результатов работы и подготовила окончательный вариант статьи. *И. В. Сергеев* предложил концепцию работы и реализовал компьютерную программу гибридного алгоритма квантового шифрования изображений, основанного на 3D-хаотической системе и принципе кубика Рубика.

Список использованных источников

1. Quantum-secured blockchain / E. O. Kiktenko, N. O. Pozhar, M. N. Anufriev [et al.]. – 2018. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1705.09258> (date of access: 23.03.2026).
2. Belkhir, M. Quantum vs classic computing: A comparative analysis / M. Belkhir, H. Benkaouha, E. Benkhelifa // Proc. of Seventh Intern. Conf. on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC 2022), Paris, France, 12–15 Dec. 2022. – Paris, 2022. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10062753> (date of access: 23.03.2026). – <https://doi.org/10.1109/FMEC57183.2022.10062753>.
3. Ahmad, J. A secure image encryption scheme based on chaotic maps and affine transformation / J. Ahmad, S. O. Hwang // Multimedia Tools and Applications. – 2016. – Vol. 75, iss. 21. – P. 13951–13976.
4. Сидоренко, А. В. Алгоритм хеширования на основе SHA-3 с использованием хаотических отображений / А. В. Сидоренко, М. С. Шишко // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 109–118. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-1-109-118>.
5. Sidorenko, A. V. The use of chaotic maps for image encryption / A. V. Sidorenko, I. V. Sergeev // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2024. – Vol. 27, no. 4. – P. 404–409. – <https://doi.org/10.5281/zenodo.14512115>.
6. Loukhaoukha, K. A secure image encryption algorithm based on Rubik's cube principle / K. Loukhaoukha, J.-Y. Chouinard, A. Berdai // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2012. – Art. 173931. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2012/173931> (date of access: 23.03.2026). – <https://doi.org/10.1155/2012/173931>.
7. Image encryption scheme based on blind signature and an improved Lorenz system / G. Ye, H. Wu, M. Lin, V. Shi // Expert Systems with Applications. – 2022. – Vol. 205. – Art. 117709. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422009964> (date of access: 23.03.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117709>.
8. NEQR: a novel enhanced quantum representation of digital images / Y. Zhang, K. Lu, Y. Gao, M. Wang // Quantum Information Processing. – 2013. – Vol. 12, iss. 8. – P. 2833–2860. – <https://doi.org/10.1007/s11128-013-0567-z>.
9. Wang, J. Quantum image translation / J. Wang, N. Jiang, L. Wang // Quantum Information Processing. – 2015. – Vol. 14, iss. 5. – P. 1589–1604. – <https://doi.org/10.1007/s11128-014-0843-6>.

References

1. Kiktenko E. O., Pozhar N. O., Anufriev M. N., Trushechkin A. S., Yunusov R. R., ..., Fedorov A. K. *Quantum-secured blockchain*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1705.09258> (accessed 23.03.2026).
2. Belkhir M., Benkaouha H., Benkhelifa E. Quantum vs classic computing: A comparative analysis. *Proceedings of Seventh International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC 2022), Paris, France, 12–15 December 2022*. Paris, 2022. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10062753> (accessed 23.03.2026). <https://doi.org/10.1109/FMEC57183.2022.10062753>.
3. Ahmad J., Hwang S. O. A secure image encryption scheme based on chaotic maps and affine transformation. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, vol. 75, iss. 21, pp. 13951–13976.
4. Sidorenko A. V., Shishko M. S. *Hashing technique based on SHA-3 using chaotic maps*. Informatika [Informatics], 2020, vol. 17, no. 1, pp. 109–118 (In Russ.). <http://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-1-109-118>.
5. Sidorenko A. V., Sergeev I. V. The use of chaotic maps for image encryption. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2024, vol. 27, no. 4, pp. 404–409. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14512115>.
6. Loukhaoukha K., Chouinard J.-Y., Berdai A. A secure image encryption algorithm based on Rubik's cube principle. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2012, art. 173931. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2012/173931> (accessed 23.03.2026). <https://doi.org/10.1155/2012/173931>.
7. Ye G., Wu H., Lin M., Shi V. Image encryption scheme based on blind signature and an improved Lorenz system. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 205, art. 117709. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422009964> (accessed 23.03.2026). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117709>.
8. Zhang Y., Lu K., Gao Y., Wang M. NEQR: a novel enhanced quantum representation of digital images. *Quantum Information Processing*, 2013, vol. 12, iss. 8, pp. 2833–2860. <https://doi.org/10.1007/s11128-013-0567-z>.
9. Wang J., Jiang N., Wang L. Quantum image translation. *Quantum Information Processing*, 2015, vol. 14, iss. 5, pp. 1589–1604. <https://doi.org/10.1007/s11128-014-0843-6>.

Информация об авторах

Сидоренко Алевтина Васильевна, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет.
E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Сергеев Игорь Вячеславович, студент, Белорусский государственный университет.
E-mail: sergeevi750@gmail.com

Information about the authors

Alevtina V. Sidorenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University.
E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Igor V. Sergeev, Student, Belarusian State University.
E-mail: sergeevi750@gmail.com

УДК 004.912:004.8

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-76-91>

Поступила в редакцию | Received 09.07.2026

Подписана в печать | Accepted 30.07.2026

Опубликована | Published 30.09.2026

Трехвекторный алгоритм обнаружения русскоязычных нейросетевых текстовых фрагментов на основе вероятностного анализа

К. С. Крез[✉], Е. Н. Шнейдеров, И. П. Галяк, Д. Д. Ефименко[✉]E-mail: karinakrez04@gmail.com*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целями работы являются разработка и программная реализация трехвекторного алгоритма обнаружения русскоязычных нейросетевых текстовых фрагментов на основе вероятностного анализа. Объект исследования – русскоязычные тексты, предмет – статистические признаки их происхождения. Особое внимание уделяется количественному сравнению предложенного подхода с базовыми одновекторными методами обнаружения – детектором на основе перплексии и методом рангового анализа GLTR.

Методы. Предложенный алгоритм объединяет три вектора признаков: предсказуемость токенов, долю редких лексем и информационную плотность текста, оцениваемую через коэффициент алгоритмического сжатия. В качестве вероятностного ядра использована авторегрессионная языковая модель `rugpt3small`. Реализация выполнена на языке Python с применением библиотек `transformers`, `PyTorch`, `NLTK` и `zlib`. Экспериментальная проверка проводилась на выборке из 100 смешанных документов (16 000 предложений) пяти тематических групп, нейросетевые фрагменты которых сгенерированы четырьмя языковыми моделями: `DeepSeek`, `GPT`, `Qwen` и `YandexAI`. Качество оценивалось по отклонению от эталонной доли нейросетевого текста и классификационным метрикам.

Результаты. После применения калибровочной поправки средний индекс по выборке составил 45,2 балла при эталонном уровне 50, а значения для всех четырех моделей находились в узком диапазоне 44,4–45,9 балла, что свидетельствует об устойчивости алгоритма к выбору генеративной модели. Отклонение среднего индекса от эталона составило 4,8 балла против 11,1 балла у метода на основе перплексии и 7,6 балла у GLTR; F1-мера на уровне предложений достигла 0,76 против 0,63 и 0,66 соответственно.

Заключение. Трехвекторный алгоритм подтвердил свою эффективность в задаче обнаружения нейросетевых фрагментов и может служить основой для инструментов проверки академических текстов и систем антиплагиата. Дальнейшее развитие исследования связано с расширением выборки, проверкой устойчивости к перефразированию и редактированию, а также проведением абляционного анализа.

Ключевые слова: нейросетевой текст, вероятностный анализ, энтропия, частотный анализ, язык программирования Python, плагиат

Для цитирования. Трехвекторный алгоритм обнаружения русскоязычных нейросетевых текстовых фрагментов на основе вероятностного анализа / К. С. Крез, Е. Н. Шнейдеров, И. П. Галяк, Д. Д. Ефименко // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 3. – С. 76–91. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-76-91>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



A three-vector algorithm for detecting Russian-language neural-network-generated text fragments based on probabilistic analysis

Karyna S. Krez[✉], Yevgeny N. Shneiderov, Ivan P. Galyak, Daniil D. Efimenko

[✉]E-mail: karinakrez04@gmail.com

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus*

Abstract

Objectives. The purpose of the work is to develop and programmatically implement a three-vector algorithm for detecting Russian-language neural network text fragments based on probabilistic analysis. The object of the study is Russian-language texts, the subject is statistical signs of their origin. Special attention is paid to the quantitative comparison of the proposed approach with the basic single-vector detection methods – the perplexity detector and the GLTR rank analysis method.

Methods. The proposed algorithm combines three feature vectors: token predictability, the proportion of rare lexemes, and the information density of the text, estimated via the algorithmic compression ratio. The author's regression language model rugpt3small is used as a probabilistic core. The implementation is made in Python using the transformers, PyTorch, NLTK, and zlib libraries. The experimental validation was conducted on a sample of 100 mixed documents (16,000 sentences) of five thematic groups, the neural network fragments of which were generated by four language models – DeepSeek, GPT, Qwen and YandexAI. The quality was assessed by the deviation from the reference proportion of the neural network text and by classification metrics.

Results. After applying the calibration adjustment, the average index for the sample was 45.2 points against a reference level of 50, and the values for all four models were in the narrow range of 44.4–45.9 points, which indicates the algorithm's stability to the choice of a generative model. The deviation of the average index from the standard was 4.8 points versus 11.1 points for the method based on perplexity and 7.6 points for GLTR; the F1 measure at the sentence level reached 0.76 versus 0.63 and 0.66, respectively.

Conclusion. The three-vector algorithm has proven its effectiveness in the task of detecting neural network fragments and can serve as the basis for tools for verifying academic texts and anti-plagiarism systems. Further development of the research is related to the expansion of the sample, testing the resistance to paraphrasing and editing, as well as conducting ablative analysis.

Keywords: neural-network text, probabilistic analysis, entropy, frequency analysis, Python programming language, plagiarism

For citation. Krez K. S., Shneiderov Y. N., Galyak I. P., Efimenko D. D. *A three-vector algorithm for detecting Russian-language neural-network-generated text fragments based on probabilistic analysis*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 3, pp. 76–91 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-76-91>.

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

Введение

В последние годы наблюдается стремительное развитие языковых моделей, способных создавать связные, грамматически корректные и стилистически однородные тексты. Появление и массовое распространение систем на основе языковых моделей, включая ChatGPT, GPT, LLaMA, DeepSeek, Qwen, GigaChat и др., привело к существенному изменению подходов к созданию текстов. Если ранее автоматическая генерация текста воспринималась преимущественно как вспомогательная технология, то сегодня нейросетевые модели способны формировать научные, публицистические, учебные тексты, которые во многих случаях трудно отличить от материалов, написанных человеком [1].

Одновременно с этим возникает проблема достоверного определения происхождения текста. Особенно она проявляется в образовательной и научной среде. Использование генеративных моделей при подготовке курсовых, дипломных, диссертационных и научных работ может нарушать принципы академической добросовестности, если вклад искусственного интеллекта (ИИ) не обозначен явно. В сфере научных публикаций наличие немаркированных нейросетевых фрагментов способно снижать доверие к результатам исследований. В средствах массовой информации и цифровой коммуникации подобные технологии могут использоваться для создания фейковых новостей, манипулятивных сообщений и иных форм дезинформации.

Существующие алгоритмы обнаружения нейросетевых текстов обладают рядом ограничений. Многие детекторы ориентированы преимущественно на англоязычные данные и демонстрируют нестабильные результаты при анализе русскоязычных материалов. Это связано со сложной морфологической системой русского языка и высокой вариативностью синтаксических конструкций. Кроме того, значительная часть существующих алгоритмов опирается на один основной признак, например перплексию, частотность n -грамм или ранговое распределение токенов. Такие модели могут быть уязвимы к перефразированию, ручному редактированию, изменению стиля, а также к использованию специальных запросов, направленных на «очеловечивание» текста [2].

Цель статьи заключается в разработке и программной реализации трехвекторного алгоритма обнаружения русскоязычных нейросетевых текстовых фрагментов на основе вероятностного анализа.

===== Теоретические основы обнаружения нейросетевых текстов

Под нейросетевым текстом в рамках данного исследования понимается текстовый фрагмент, полностью или частично созданный генеративной языковой моделью. Современные языковые модели строятся на архитектуре трансформеров и обучаются на больших массивах текстовых данных. Основной принцип их работы заключается в предсказании следующего токена на основе предыдущего контекста [3].

Главная особенность таких моделей состоит в том, что они не обладают собственным пониманием текста в человеческом смысле, а воспроизводят статистически вероятные языковые последовательности. В результате формируемый текст преимущественно опирается на устойчивые языковые конструкции и распространенные речевые паттерны. Это способствует обеспечению высокой грамматической корректности и стилистической согласованности. Вместе с тем зависимость от статистически наиболее вероятных решений может приводить к снижению лингвистической вариативности. На количественном уровне данная особенность выражается в повышенной предсказуемости текста, однородности его структуры, ограниченном использовании редких лексических единиц и высокой степени алгоритмической сжимаемости [4, 5].

Тексты, написанные человеком, как правило, обладают большей вариативностью. Человек может использовать редкие слова, авторские обороты, асимметричные синтаксические конструкции, непредсказуемые переходы между мыслями и индивидуальные стилистические особенности. Даже в академическом тексте, где стиль является более формализованным, сохраняются признаки человеческой языковой вариативности.

В основе обнаружения нейросетевых текстов лежит выявление статистических закономерностей и отклонений. Однако использования только одного признака недостаточно, поскольку современные языковые модели постоянно совершенствуются и все успешнее имитируют человеческую манеру письма.

Анализ существующих алгоритмов обнаружения ИИ-фрагментов

Среди распространенных алгоритмов и инструментов обнаружения нейросетевых текстов можно выделить две группы методов.

Первую группу составляют методы, основанные на перплексии. Перплексия показывает, насколько неожиданным является текст для языковой модели. Если текст имеет низкую перплексию, это означает, что его последовательность токенов хорошо предсказывается моделью. Поскольку генеративные системы часто создают статистически вероятные фразы, низкая перплексия может указывать на ИИ-происхождение текста. Однако данный подход имеет существенный недостаток: научные и учебные тексты также могут быть достаточно предсказуемыми из-за терминологической устойчивости, шаблонных конструкций и формального стиля изложения.

Вторая группа включает методы рангового анализа токенов, например Giant Language Model Test Room (GLTR). Подобные алгоритмы оценивают, насколько часто реальные слова текста входят в список наиболее вероятных продолжений, предложенных языковой моделью. Если значительная часть слов находится в верхней зоне вероятностного распределения, текст может быть классифицирован как нейросетевой. Недостатком данных методов является зависимость от жестких пороговых значений и выбранной языковой модели. При анализе русскоязычных академических текстов возможно большое количество ложноположительных срабатываний из-за терминологической специфики [6, 7].

Среди значимых зарубежных исследований следует отметить работу Gehrman et al. [9], в которой предложен инструмент GLTR для анализа рангового распределения токенов в тексте, а также метод DetectGPT, основанный на оценке кривизны функции логарифмического правдоподобия [10]. Отдельное направление исследований образуют методы цифровой маркировки, предусматривающие внедрение водяных знаков непосредственно в процессе генерации текста [11].

Ограничения рассмотренных методов свидетельствуют о необходимости совместного анализа нескольких взаимодополняющих характеристик текста. В связи с этим в статье предложен трехвекторный алгоритм, объединяющий показатели предсказуемости токенов, доли редких лексем и информационной плотности текста. Для оценки его эффективности проведено прямое количественное сравнение с детектором на основе перплексии и методом GLTR. Все три метода исследовались на единой тестовой выборке с использованием одинаковой предварительной обработки и общей эталонной разметки.

Обоснование выбора признаков трехвекторного алгоритма

В основу разработанного алгоритма положен анализ трех групп признаков: вероятностной предсказуемости текста, характера распределения лексических единиц и информационной плотности. Выбор данного набора признаков обусловлен их способностью

выявлять аномалии на различных уровнях текстовой организации. Комплексное использование указанных показателей обеспечивает многомерный анализ текстового материала и позволяет фиксировать ключевые различия между машинно-сгенерированными текстами и текстами, созданными человеком.

Первый признак – предсказуемость – отражает степень соответствия текста наиболее вероятным языковым продолжениям. Нейросетевые модели, особенно при стандартных параметрах генерации, часто выбирают токены из верхней части вероятностного распределения. В ИИ-текстах доля слов, входящих в число наиболее вероятных вариантов, обычно выше.

Для человеческого текста характерна большая вариативность, поэтому доля токенов, попадающих в верхнюю зону вероятностного распределения, обычно ниже.

Второй признак связан с долей редких слов. Под редкими понимаются токены, которые языковая модель оценивает как низковероятные в конкретном контексте. Человеческие тексты чаще включают такие слова.

Нейросетевые тексты, напротив, часто характеризуются большей лексической монотонностью. Даже если они выглядят грамматически корректными, их словарный состав может быть более сглаженным и статистически безопасным. Низкая доля редких лексем может рассматриваться как один из признаков ИИ-генерации.

Третий признак основан на оценке алгоритмической сжимаемости текста. Если текст содержит много повторяющихся или структурно однотипных элементов, он лучше сжимается стандартными алгоритмами компрессии. Нейросетевые тексты нередко обладают более равномерной структурой, повторяемыми конструкциями и меньшей степенью информационной неоднородности. Это может приводить к более высокой сжимаемости.

Человеческий текст, особенно в научной или аналитической работе, может содержать больше локальных смысловых переходов, терминологических вставок и индивидуальных формулировок. В результате его информационная плотность может быть выше, а коэффициент сжатия – менее однозначным [8].

Предлагаемый алгоритм основан на анализе текста с помощью авторегрессионной языковой модели, используемой в качестве вероятностного ядра. В практической реализации применялась модель `sberbank-ai/rugpt3small_based_on_gpt2`, позволяющая получать распределение вероятностей для токенов русскоязычного текста.

В статье единицей анализа является предложение. Последовательные предложения объединяются в более крупные текстовые единицы, для обозначения которых далее используется единый термин «фрагмент».

Эталонная метка задается для каждого предложения. Эталонная доля S_e и выявленная доля S_a рассчитываются в единой символьной шкале. Эти величины определяются следующим образом:

$$S_e = \frac{\sum_{j \in A} l_j}{\sum_{j=1}^{n_n} l_j}, \quad S_a = \frac{\sum_{j \in B} l_j}{\sum_{j=1}^{n_n} l_j}, \quad (1)$$

где A – множество предложений с эталонной меткой ИИ; B – множество предложений, отнесенных к ИИ алгоритмом; l_j – длина j -го предложения в символах; n_n – количество предложений в документе.

Равенство количества человеческих и сгенерированных предложений само по себе не гарантирует долю 50 % по символам, поэтому S_e вычисляется отдельно для каждого документа и используется при расчете Δ .

Для каждого фрагмента рассчитываются три независимых вектора:

1. Вектор предсказуемости отражает долю токенов, которые входят в топ-50 наиболее вероятных продолжений, предсказанных языковой моделью. Обозначим эту долю как R_{50} . Чем выше значение данного показателя, тем более предсказуемым является текст.

Для нормализации используется сигмоидальная функция

$$P = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(R_{50} - 0,85)}}, \quad (2)$$

где P – значение вектора предсказуемости; R_{50} – доля токенов, входящих в топ-50 наиболее вероятных предсказаний; 0,85 – эмпирический порог; α – коэффициент крутизны сигмоидальной функции; e – основание натурального логарифма.

Если доля предсказуемых токенов превышает 0,85, оценка нейросетевого происхождения фрагмента возрастает.

2. Вектор монотонности оценивает долю редких лексем. Под редкими понимаются токены, ранг которых в вероятностном распределении превышает 1000. Обозначим долю таких токенов как R_r .

Для оценки используется инвертированная сигмоидальная функция

$$M = \frac{1}{1 + e^{\beta(R_r - 0,01)}}, \quad (3)$$

где M – значение вектора монотонности, R_r – доля редких токенов, 0,01 – эмпирический центр функции, β – коэффициент крутизны, e – основание натурального логарифма.

Чем больше редких слов содержит текст, тем ниже значение M , а следовательно, тем ниже оценка его нейросетевого происхождения.

3. Вектор информационной плотности основан на коэффициенте алгоритмического сжатия текста. Для его вычисления используется библиотека `zlib`. Коэффициент сжатия определяется как отношение объема сжатого текста к объему исходного текста:

$$R_c = \frac{V_c}{V_o}, \quad (4)$$

где R_c – коэффициент сжатия, V_c – объем текста после сжатия, V_o – исходный объем текста.

Для получения нормализованной оценки используется функция

$$C = \frac{K_L}{1 + e^{\gamma(R_c - 0,45)}}, \quad (5)$$

где C – значение вектора информационной плотности, R_C – коэффициент алгоритмического сжатия, 0,45 – эмпирический порог, γ – коэффициент крутизны, K_L – коэффициент штрафа за малую длину текста.

Коэффициент штрафа за длину текста можно задать следующим образом:

$$K_L = \min\left(1, \frac{N}{1000}\right), \quad (6)$$

где N – количество символов в анализируемом фрагменте текста. При длине фрагмента менее 1000 символов надежность итоговой оценки снижается, поскольку короткие тексты хуже поддаются устойчивому статистическому анализу.

Коэффициент сжатия `zlib` обладает достаточной информативностью преимущественно при анализе текстов большого объема, тогда как на коротких фрагментах его значения характеризуются высокой вариативностью. Для большинства отдельных предложений применяется штрафной коэффициент K_L , учитывающий недостаточную длину текста, вследствие чего значимость третьего вектора существенно снижается. Поэтому значение компонента C , рассчитанное для фрагментов объемом менее 1000 символов, не может рассматриваться как самостоятельный надежный признак происхождения текста. Для снижения влияния данного ограничения компонент C рассчитывался на объединенных последовательностях соседних фрагментов общей длиной не менее 1000 символов.

Итоговая оценка нейросетевого происхождения фрагмента рассчитывается как линейная комбинация трех векторов:

$$S_b = w_P \cdot P + w_M \cdot M + w_C \cdot C \quad (7)$$

при условии

$$w_P + w_M + w_C = 1, \quad (8)$$

где S_b – итоговая оценка нейросетевого происхождения фрагмента, P – вектор предсказуемости, M – вектор монотонности, C – вектор информационной плотности, w_P , w_M , w_C – весовые коэффициенты.

В программной реализации использовались следующие значения коэффициентов: $\alpha = 20$, $\beta = 300$, $\gamma = 15$, $w_P = 0,6$, $w_M = 0,3$, $w_C = 0,1$. Пороговые значения 0,85, 0,01 и 0,45, а также указанные коэффициенты определялись на отдельной калибровочной выборке, которая не пересекалась с основной тестовой выборкой из 100 документов.

Калибровочная выборка включала 40 документов, состоявших из 6400 предложений, половина из которых была сгенерирована с помощью ИИ. Документы относились к пяти тематическим группам и были равномерно распределены с учетом тематики и использованных генеративных моделей. Выборка разделялась на обучающую и валидационную части в соотношении 70/30. Значения параметров подбирались на обучающей части таким образом, чтобы минимизировать отклонение Δ , после чего полученные результаты проверялись на валидационной части.

Общая оценка нейросетевого происхождения определяется как средневзвешенное значение по всем фрагментам текста. В качестве веса используется длина соответствующего фрагмента в символах:

$$S_d = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}, \quad (9)$$

где S_d – итоговая оценка документа, S_i – оценка i -го фрагмента, L_i – длина i -го фрагмента, n – количество фрагментов.

Такой подход позволяет анализировать как полностью сгенерированные тексты, так и документы со смешанной структурой, где нейросетевые фрагменты могут быть встроены в авторский текст.

===== Практическая реализация алгоритма

Практическая реализация алгоритма выполнена на языке программирования Python. В качестве основных инструментов использовались следующие библиотеки и технологии: transformers – для работы с языковой моделью, PyTorch – для выполнения вычислений и получения выходных вероятностных распределений, zlib – для расчета коэффициента сжатия, NLTK – для предварительной обработки и разделения текста, стандартные средства Python – для обработки файлов, агрегации результатов и формирования итоговой оценки.

Обработка текста включает четыре этапа:

1. Выполняется предварительная подготовка текста: удаление лишних пробелов, нормализация строк и разделение текста на предложения. Далее предложения группируются во фрагменты, что позволяет анализировать длинные документы без превышения ограничений языковой модели. Текст разделялся на фрагменты длиной не более 500 символов. Для сохранения локального контекста соседние фрагменты перекрывались на 50 символов. Фрагменты объемом менее 100 символов исключались из анализа, а максимальная длина контекста языковой модели ограничивалась 1024 токенами.

2. Каждый фрагмент токенизируется и передается на вход авторегрессионной модели. Модель формирует вероятностное распределение токенов, на основе которого рассчитываются показатели предсказуемости и доли редких лексем.

3. Для каждого фрагмента вычисляется коэффициент сжатия с использованием библиотеки zlib. Это позволяет получить независимую оценку информационной плотности текста.

4. Выполняется расчет итоговой оценки нейросетевого происхождения для каждого фрагмента. После этого результаты агрегируются в итоговую оценку документа.

Важным преимуществом реализации алгоритма является использование открытых инструментов и библиотек, допускающих применение в исследовательских и прикладных программных системах.

Методология эксперимента

Экспериментальная оценка алгоритма проводилась на выборке из 100 смешанных документов. Каждый документ содержал 160 предложений: 80 написанных человеком и 80 сгенерированных четырьмя языковыми моделями – DeepSeek, GPT, Qwen и YandexAI – по 20 предложений от каждой модели.

Для обеспечения тематического разнообразия выборка была разделена на пять смысловых групп по 20 документов в каждой:

- курсовые работы по теме разработки программного средства;
- предложения из опубликованных произведений русских писателей, в том числе Л. Н. Толстого, М. А. Булгакова, А. П. Чехова, Ф. М. Достоевского, И. С. Тургенева, А. С. Пушкина и др.;
- курсовые работы по теме экономики электронного бизнеса;
- курсовые работы по теме международных отношений в туризме;
- научно-популярные статьи по информационным технологиям.

Нейросетевые фрагменты создавались с использованием одинакового по структуре запроса и с сохранением стиля соответствующей смысловой группы. Это обеспечивало сопоставимость условий внутри основного эксперимента.

Варианты перефразирования, ручного редактирования сгенерированного текста и использования запросов, направленных на имитацию естественного авторского стиля, в рамках настоящего эксперимента не исследовались. Все нейросетевые фрагменты создавались в стандартном режиме с применением унифицированного запроса. Поэтому устойчивость предложенного комплексного подхода к указанным способам модификации текста рассматривается как исследовательская гипотеза, требующая самостоятельной экспериментальной проверки. Для подтверждения основного положения исследования разработанный алгоритм был сопоставлен с двумя базовыми одновекторными методами на той же выборке из 100 документов. Первый базовый метод использовал перплексию, рассчитанную той же авторегрессионной моделью; второй метод реализовывал ранговый анализ GLTR. Все методы использовали одинаковую предварительную обработку и единую эталонную разметку.

Для каждого фрагмента определялась перплексия, а итоговое значение для документа рассчитывалось как средневзвешенное с учетом длины фрагментов. Фрагмент относился к сгенерированным с помощью ИИ, если значение его перплексии было ниже порога $\theta_P = 38,5$.

В методе GLTR вычислялась доля токенов, входящих в топ-50 наиболее вероятных вариантов. Если она превышала порог $\theta_G = 0,72$, фрагмент классифицировался как нейросетевой. Оба пороговых значения определялись на калибровочной выборке и не изменялись при обработке тестовых данных.

Итоговый индекс документа для каждого базового метода рассчитывался как доля символов во фрагментах, классифицированных как сгенерированные с помощью ИИ. Полученное значение переводилось в шкалу от 0 до 100. Сравнение методов проводилось на одних и тех же документах с использованием парных результатов.

В ходе эксперимента оценивались следующие показатели:

- доля текста, классифицированного как нейросетевой;
- отклонение полученного результата от эталонной доли нейросетевого текста;

- продолжительность анализа;
- пиковое потребление оперативной памяти;
- устойчивость алгоритма при обработке текстов, созданных различными генеративными моделями;
- доля правильных классификаций (Accuracy), точность (Precision), полнота (Recall) и F1-мера на уровне предложений;
- средняя абсолютная ошибка определения доли нейросетевого текста;
- 95%-ные доверительные интервалы (ДИ) разностей между результатами сравниваемых методов;
- результаты парного статистического теста с поправкой на множественные сравнения.

Отклонение от эталонной доли нейросетевого текста рассчитывалось по формуле

$$\Delta = |S_e - S_a|, \quad (10)$$

где Δ – абсолютное отклонение выявленной доли от эталона; S_e – фактическая эталонная доля символов в предложениях с меткой ИИ в конкретном документе; S_a – доля символов в предложениях, отнесенных алгоритмом к ИИ. Использование постоянной эталонной доли $S_e = 50\%$ допустимо только при подтвержденном равенстве человеческой и ИИ-частей по числу символов.

Результаты экспериментальной оценки и показатели вычислительной эффективности алгоритма представлены в табл. 1.

Таблица 1

Детализация индекса нейросетевого происхождения по пяти смысловым группам и четырем генеративным моделям

Table 1

Neural-origin index by five thematic groups and four generative models

Модель Model	Среднее, баллы Average, points	SD	Диапазон, баллы Range, points	95 % ДИ, баллы 95 % CI, points	t, c	RAM, МБ
1. Курсовые работы: разработка программного средства						
DeepSeek	45,26	1,68	41,87–48,05	44,47–46,05	3,44	0,3
GPT	44,69	2,08	40,61–49,10	43,72–45,66	3,16	0,4
Qwen	45,94	1,63	42,68–48,35	45,18–46,70	2,64	0,3
YandexAI	46,13	1,53	43,06–49,32	45,41–46,85	3,24	0,3
2. Произведения русских писателей						
DeepSeek	43,96	1,79	40,53–47,41	43,12–44,80	3,34	0,3
GPT	43,64	2,23	38,54–48,23	42,60–44,68	3,08	0,5
Qwen	44,69	1,76	41,83–48,01	43,87–45,51	2,56	0,3
YandexAI	45,23	1,65	41,90–48,68	44,46–46,00	3,16	0,3

Окончание табл. 1

End of table 1

Модель <i>Model</i>	Среднее, баллы <i>Average, points</i>	SD	Диапазон, баллы <i>Range, points</i>	95 % ДИ, баллы <i>95 % CI, points</i>	<i>t, c</i>	RAM, МБ
<i>3. Курсовые работы: экономика электронного бизнеса</i>						
DeepSeek	45,46	1,70	42,07–48,16	44,66–46,26	3,40	0,3
GPT	44,84	2,10	40,80–50,04	43,86–45,82	3,14	0,4
Qwen	46,04	1,65	42,80–48,47	45,27–46,81	2,62	0,3
YandexAI	46,28	1,55	43,22–49,84	45,55–47,01	3,22	0,3
<i>4. Курсовые работы: международные отношения в туризме</i>						
DeepSeek	45,11	1,72	41,69–47,93	44,31–45,91	3,38	0,3
GPT	44,54	2,15	39,83–49,42	43,53–45,55	3,12	0,5
Qwen	45,79	1,69	42,39–48,38	45,00–46,58	2,58	0,3
YandexAI	46,03	1,58	42,74–49,37	45,29–46,77	3,18	0,3
<i>5. Научно-популярные статьи по информационным технологиям</i>						
DeepSeek	45,01	1,68	41,76–47,87	44,22–45,80	3,34	0,3
GPT	44,49	2,09	40,11–49,20	43,51–45,47	3,10	0,4
Qwen	45,49	1,63	42,31–48,20	44,73–46,25	2,60	0,3
YandexAI	45,98	1,53	42,81–49,20	45,26–46,70	3,20	0,3
<i>Средние значения</i>						
DeepSeek	44,96	1,76	40,53–48,16	44,61–45,31	3,38	0,3
GPT	44,44	2,13	38,54–50,04	44,02–44,86	3,12	0,4
Qwen	45,59	1,71	41,83–48,47	45,25–45,93	2,60	0,3
YandexAI	45,93	1,58	41,90–49,84	45,62–46,24	3,20	0,3
Все модели	45,23	0,97	43,05–47,25	45,04–45,42	3,08	0,3

Данные табл. 1 позволяют сделать следующие выводы:

– значения калиброванного индекса для четырех генеративных моделей находятся в узком диапазоне от 44,44 до 45,93 балла. Межмодельный разброс составляет менее 1,5 балла, что свидетельствует о слабой зависимости результатов от используемой генеративной модели. При этом калиброванный индекс является условным показателем и не должен интерпретироваться как точность классификации или процентная доля нейросетевого текста;

– наибольшее среднее значение индекса получено для YandexAI – 45,93 балла, наименьшее для GPT – 44,44 балла. Для Qwen и DeepSeek данный показатель составил 45,59 и 44,96 балла соответственно;

– среднее значение индекса по всей выборке составило 45,23 балла, что на 4,8 балла ниже эталонного уровня, равного 50;

– 95%-ные доверительные интервалы моделей с близкими средними значениями частично пересекаются, что указывает на незначительные различия между ними;

– продолжительность анализа одной парной подвыборки составила от 2,56 до 3,44 с, а обработка полного документа заняла около 12 с. Дополнительное потребление оперативной памяти при анализе одного документа составило 0,3–0,5 МБ без учета памяти, занимаемой языковой моделью. Полученные показатели свидетельствуют о вычислительной эффективности алгоритма.

Результаты сравнительного анализа трехвекторного алгоритма и базовых одновекторных методов на одной и той же выборке представлены в табл. 2.

Таблица 2

Калиброванные индексы трехвекторного алгоритма и базовых одновекторных методов на выборке из 100 документов

Table 2

Calibrated indices of the three-vector algorithm and baseline single-vector methods on a Sample of 100 Documents

Метод <i>Method</i>	Среднее значение индекса, баллы (0–100) <i>Average index value, points (0–100)</i>	Разность с уровнем 50, баллы <i>Difference from level 50, points</i>	СКО, баллы <i>Standard deviation, points</i>	95 % ДИ индекса, баллы <i>95% CI of the index, points</i>	Время, с <i>Time, s</i>
Перплексия	38,87	11,13	2,84	38,31–39,43	11,6
GLTR	42,36	7,64	2,51	41,86–42,86	11,9
Трехвекторный	45,23	4,77	0,97	45,04–45,42	12,3

Данные табл. 2 позволяют сделать следующие выводы:

– средний калиброванный индекс трехвекторного алгоритма отклоняется от условного эталонного уровня на 4,8 балла. Для метода на основе перплексии отклонение составляет 11,1 балла, а для GLTR – 7,6 балла;

– разброс значений трехвекторного алгоритма в 2,6–2,9 раза ниже, чем у базовых методов;

– средняя разность ошибок между трехвекторным алгоритмом и методом на основе перплексии составляет 6,4 балла в пользу предлагаемого алгоритма (95%-ный ДИ: 5,8–7,0 балла);

– по сравнению с GLTR средняя разность ошибок составляет 2,9 балла в пользу трехвекторного алгоритма (95%-ный ДИ: 2,3–3,5 балла);

– средняя абсолютная ошибка определения доли нейросетевого текста составляет 5,1 балла для трехвекторного алгоритма, 11,2 балла для метода на основе перплексии и 7,9 балла для GLTR.

Классификационные показатели сравнительных методов трехвекторного алгоритма на уровне предложений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Классификационные метрики сравниваемых методов
на уровне предложений

Table 3

Sentence-level classification metrics of the compared methods

Метод <i>Method</i>	Accuracy	Precision	Recall	F1
Перплексия	0,65	0,66	0,60	0,63
GLTR	0,68	0,70	0,62	0,66
Трехвекторный	0,78	0,81	0,72	0,76

Данные табл. 3 показывают, что трехвекторный алгоритм превосходит базовые методы по всем рассматриваемым классификационным показателям. Значение F1-меры превышает результат метода на основе перплексии на 0,13, а метода GLTR – на 0,10. Преимущество алгоритма обусловлено одновременным повышением точности и полноты классификации.

Для описательной оценки значимости отдельных векторов проведен компонентный анализ. Средние значения компонентов для сгенерированных фрагментов составили $P = 0,52$, $M = 0,38$ и $C = 0,14$. С учетом установленных весовых коэффициентов этим значениям соответствует средний некалиброванный индекс около 44 баллов, тогда как для фрагментов, написанных человеком, он составляет примерно 11 баллов.

Относительно низкое значение вектора C обусловлено применением коэффициента K_L , который снижает оценку коротких фрагментов. Возникающее вследствие этого смещение частично компенсируется аддитивной калибровочной поправкой, о чем свидетельствует небольшое отклонение среднего калиброванного индекса от условного эталонного уровня. Обозначение K_L используется для коэффициента штрафа за недостаточную длину текста и не связано с дивергенцией Кульбака – Лейблера. Количественная оценка влияния каждого вектора посредством абляционного анализа не входила в задачи основного эксперимента и рассматривается как направление дальнейших исследований.

Заключение

В статье разработан и программно реализован трехвекторный алгоритм обнаружения русскоязычных нейросетевых текстовых фрагментов, объединяющий показатели предсказуемости токенов, доли редких лексем и информационной плотности текста. Экспериментальная проверка проводилась на текстах, сгенерированных моделями DeepSeek, GPT, Qwen и YandexAI.

На исследованной выборке отклонение среднего калиброванного индекса трехвекторного алгоритма от условного эталонного уровня составило 4,8 балла, метода на основе перплексии – 11,1 балла, а метода GLTR – 7,6 балла. Алгоритм также показал меньший разброс результатов. Значение F1-меры трехвекторного алгоритма составило 0,76, метода на основе перплексии – 0,63, а метода GLTR – 0,66. Полученные результаты свидетельствуют о преимуществе комбинированного подхода в исследованных условиях.

Средний калиброванный индекс по всей выборке составил 45,2 балла. Значения, полученные для моделей DeepSeek, GPT, Qwen и YandexAI, находились в узком диапазоне от 44,4 до 45,9 балла. Небольшой межмодельный разброс свидетельствует об устойчивости алгоритма, однако отклонение от эталонного уровня указывает на сохранение незначительного занижения результата. Компонентный анализ показал, что основное значение имеют векторы предсказуемости и доли редких лексем, тогда как значимость вектора информационной плотности на коротких фрагментах снижается.

Разработанный алгоритм может использоваться как основа для систем проверки академических работ и анализа происхождения текста. Дальнейшие исследования предполагают расширение выборки, проверку на независимых данных, изучение различных режимов генерации и редактирования, совершенствование показателя zlib, применение вероятностной калибровки и проведение абляционного анализа.

Вклад авторов. *К. С. Крез* подготовила данные и утвердила окончательную версию статьи. *Е. Н. Шнейдеров* внес значительный вклад в концепцию работы, научное руководство и редактуру содержания. *И. П. Галяк* разработал концепцию алгоритма и его программную реализацию. *Д. Д. Ефименко* осуществил сбор, анализ и оформление результатов эксперимента.

Список использованных источников

1. Ивахненко, Е. Н. ChatGPT в высшем образовании и науке: угроза или ценный ресурс? / Е. Н. Ивахненко, В. С. Никольский // Высшее образование в России. – 2023. – Т. 32, № 4. – С. 9–22.
2. Федотова, А. М. Методика идентификации текстов, сгенерированных большими языковыми моделями / А. М. Федотова, А. С. Романов // Информатика и автоматизация. – 2025. – Т. 24, № 5. – С. 1444–1470.
3. Мачковская, Л. Я. Генеративные модели искусственного интеллекта в преподавании русского языка как иностранного: возможности, ограничения и риски / Л. Я. Мачковская, А. В. Фатина, О. А. Ветошкина // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 11-1. – С. 73–78.
4. Айдагулова, А. Р. Особенности текстов, сгенерированных искусственным интеллектом / А. Р. Айдагулова // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. – 2023. – № 4 (72). – С. 154–156.
5. Брызгалина, Е. В. Вызовы технологий искусственного интеллекта для этической экспертизы исследований живых систем / Е. В. Брызгалина // Теоретическая и прикладная этика: традиции и перспективы : материалы XVI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 16–18 нояб. 2023 г. – СПб. : Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2024. – С. 57–58.
6. Вейс, И. А. Распознавание паттернов применения искусственного интеллекта при создании текстов / И. А. Вейс // Современные инновации, системы и технологии. – 2025. – Т. 5, № 1. – С. 1033–1040.
7. Василевская, А. В. ИИ в количественном исследовании: проверка устойчивости к манипуляциям и искажениям фактов / А. В. Василевская // Теоретическая и прикладная этика: традиции и перспективы : материалы XVI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 16–18 нояб. 2023 г. – СПб. : Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2024. – С. 67–68.
8. Никитина, А. С. Человек или AI: к вопросу об авторстве / А. С. Никитина // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. – 2024. – № 1 (24). – С. 182–186.

9. Gehrmann, S. GLTR: Statistical detection and visualization of generated text / S. Gehrmann, H. Strobel, A. M. Rush // Proc. of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, Florence, Italy, 28 July – 2 Aug. 2019. – Florence, 2019. – P. 111–116.
10. DetectGPT: Zero-shot machine-generated text detection using probability curvature / E. Mitchell, Y. Lee, A. Khazatsky [et al.] // Proc. of the 40th Intern. Conf. on Machine Learning (ICML 2023), Honolulu, Hawaii, USA, 23–29 July 2023. – Honolulu, 2023. – P. 24950–24962.
11. Watermark for large language models / J. Kirchenbauer, J. Geiping, Y. Wen [et al.] // Proc. of the 40th Intern. Conf. on Machine Learning (ICML 2023), Honolulu, Hawaii, USA, 23–29 July 2023. – Honolulu, 2023. – P. 17061–17084.

References

1. Ivakhnenko E. N., Nikolsky V. S. *ChatGPT in higher education and science: A threat or a valuable resource?* Vysshee obrazovanie v Rossii [*Higher Education in Russia*], 2023, vol. 32, no. 4, pp. 9–22 (In Russ.).
2. Fedotova A. M., Romanov A. S. *Methodology for identifying texts generated by large language models.* Informatika i avtomatizatsiya [*Computer Science and Automation*], 2025, vol. 24, no. 5, pp. 1444–1470 (In Russ.).
3. Machkovskaya L. Ya., Fatina A. V., Vetoshkina O. A. *Generative artificial intelligence models in teaching Russian as a foreign language: Opportunities, limitations, and risks.* Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [*International Journal of Humanities and Natural Sciences*], 2025, no. 11-1, pp. 73–78 (In Russ.).
4. Aydagulova A. R. *Features of texts generated by artificial intelligence.* Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. M. Akmully [*Bulletin of M. Akmulla Bashkir State Pedagogical University*], 2023, no. 4 (72), pp. 154–156 (In Russ.).
5. Bryzgalina E. V. *Challenges of artificial intelligence technologies for the ethical review of living systems research.* Teoreticheskaya i prikladnaya etika: traditsii i perspektivy: materialy XVI Mezhdunarodnoj konferencii, Sankt-Peterburg, 16–18 nojabrja 2023 g. [*Theoretical and Applied Ethics: Traditions and Prospects: Proceedings of the 16th International Conference, Saint Petersburg, 16–18 November 2023*]. Saint Petersburg, Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2024, pp. 57–58 (In Russ.).
6. Veys I. A. *Recognition of artificial intelligence application patterns in text creation.* Sovremennye innovatsii, sistemy i tekhnologii [*Modern Innovations, Systems and Technologies*], 2025, vol. 5, no. 1, pp. 1033–1040 (In Russ.).
7. Vasilevskaya A. V. *AI in quantitative research: Testing resilience to manipulation and factual distortions.* Teoreticheskaya i prikladnaya etika: traditsii i perspektivy: materialy XVI Mezhdunarodnoj konferencii, Sankt-Peterburg, 16–18 nojabrja 2023 g. [*Theoretical and Applied Ethics: Traditions and Prospects: Proceedings of the 16th International Conference, Saint Petersburg, 16–18 November 2023*]. Saint Petersburg, Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2024, pp. 67–68 (In Russ.).
8. Nikitina A. S. *Human or AI: On the issue of authorship.* Vestnik molodykh uchenykh i spetsialistov Samarskogo universiteta [*Bulletin of Young Scientists and Specialists of Samara University*], 2024, no. 1 (24), pp. 182–186 (In Russ.).
9. Gehrmann S., Strobel H., Rush A. M. GLTR: Statistical detection and visualization of generated text. *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, Florence, Italy, 28 July – 2 August 2019.* Florence, 2019, pp. 111–116.
10. Mitchell E., Lee Y., Khazatsky A., Manning C. D., Finn C. DetectGPT: Zero-shot machine-generated text detection using probability curvature. *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML 2023), Honolulu, Hawaii, USA, 23–29 July 2023.* Honolulu, 2023, pp. 24950–24962.

11. Kirchenbauer J., Geiping J., Wen Y., Katz J., Miers I., Goldstein T. A watermark for large language models. *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML 2023)*, Honolulu, Hawaii, USA, 23–29 July 2023. Honolulu, 2023, pp. 17061–17084.

Информация об авторах

Крез Карина Сергеевна, аспирант, ассистент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: karinakrez04@gmail.com

Шнейдеров Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, проректор по учебной работе, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: shneiderov@bsuir.by

Галяк Иван Павлович, студент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: haliak.ivanba@gmail.com

Ефименко Даниил Дмитриевич, студент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: Dhmainer@gmail.com

Information about the authors

Karyna S. Krez, Postgraduate Student, Assistant of the Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: karinakrez04@gmail.com

Yevgeny N. Shneiderov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Information and Computer Systems Design, Vice-Rector for Academic Affairs, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: shneiderov@bsuir.by

Ivan P. Galyak, Student at the Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: haliak.ivanba@gmail.com

Daniil D. Efimenko, Student at the Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: Dhmainer@gmail.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.8:519.876.5
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-92-106>

Поступила в редакцию | Received 01.06.2026
Подписана в печать | Accepted 22.06.2026
Опубликована | Published 30.09.2026

Вероятностный трансформер для предиктивного мониторинга редакционного процесса

Д. А. Сьянов
E-mail: syanov@bsu.by

*Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целью исследования является разработка подхода к прогнозированию сроков наступления нескольких ключевых точек в многоэтапных процессах.

Методы. Предложен метод, основанный на обработке последовательностей событий с учетом стадий, промежутков времени и сведений об участниках процесса, а также на согласованном учете взаимосвязей между прогнозируемыми этапами.

Результаты. Проведенные эксперименты на данных редакционного документооборота показали повышение точности по сравнению с рекуррентными нейронными сетями и существенное преимущество на ранних этапах по сравнению с моделями градиентного бустинга.

Заключение. Метод позволяет получать согласованные интервальные прогнозы для нескольких этапов процесса и может использоваться для оперативного обновления оценок без применения специализированного оборудования.

Ключевые слова: предиктивный мониторинг процессов, вероятностный трансформер, прогнозирование задержек, квантильная регрессия, машинное обучение

Для цитирования. Сьянов, Д. А. Вероятностный трансформер для предиктивного мониторинга редакционного процесса / Д. А. Сьянов // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 3. – С. 92–106. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-92-106>.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

A probabilistic transformer for predictive monitoring of editorial process

Dmitry A. Syanov

E-mail: syanov@bsu.by

Belarusian State University

av. Nezavisimosti 4, Minsk, 220030, Belarus

Abstract

Objectives. The aim of this study is to develop an approach for predicting the timing of several key stages in multi-stage processes.

Methods. A method is proposed based on processing event sequences taking into account stages, time intervals, and information about process participants, as well as a consistent consideration of the relationships between the predicted stages.

Results. Experiments conducted on editorial document flow data demonstrated improved accuracy compared to recurrent neural networks and a significant advantage in the early stages compared to gradient boosting models.

Conclusion. The method allows obtaining of consistent interval forecasts for several stages of a process and can be used to quickly update the estimates without the use of specialized equipment.

Keywords: predictive process monitoring, probabilistic transformer, delay forecasting, quantile regression, machine learning

For citation. Syanov D. A. *A probabilistic transformer for predictive monitoring of editorial process*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 3, pp. 92–106 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-3-92-106>.

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

Введение

Редакционный документооборот в системах управления журналами Open Journals System (OJS) реализуется как дискретно-событийный процесс, в рамках которого рукопись последовательно проходит этапы подачи материала, назначения рецензентов, рецензирования, вынесения редакторского решения и публикации. Согласно подходам процессной аналитики [1, 2] каждая такая последовательность событий рассматривается как экземпляр бизнес-процесса, а совокупность экземпляров формирует журнал событий, содержащий информацию о времени обработки, задержках и траекториях прохождения рукописей. При этом структура рассматриваемых процессов отличается высокой стохастичностью, так как длительности стадий существенно варьируются (от часов до месяцев), загрузка редакторов и рецензентов изменчива, а входящий поток обладает выраженной нерегулярностью. Данные факторы формируют сложную динамику очередей и задержек, что затрудняет использование традиционных методов моделирования и требует внедрения подходов, способных корректно описывать и прогнозировать эволюцию многомерного стохастического процесса в различных режимах нагрузки.

В этой связи особую значимость приобретают методы предиктивного мониторинга, обеспечивающие оценку будущих характеристик текущего экземпляра на основе наблюдаемого префикса журнала событий [3]. Возможность своевременно прогнозировать

вать длительности стадий, будущие контрольные точки и вероятность задержек имеет ключевое значение для оперативного принятия решений, планирования редакционных ресурсов и параметризации имитационных моделей. Однако обзорные исследования [4] показывают, что существующие методы остаются ограниченными, так как они обычно дают точечные оценки единственной скалярной характеристики (например, оставшегося времени), используют несопоставимые экспериментальные настройки и не рассматривают совместный вероятностный прогноз нескольких будущих событий. Кроме того, современные методы кодирования временной структуры журналов событий практически не исследованы.

Обзор смежных работ

Предиктивный мониторинг бизнес-процессов охватывает широкий спектр задач, отличающихся по типу прогнозируемой характеристики и требуемой глубине анализа. В частности, Тейнемаа и др. [3] выделяют класс задач прогноза исхода, где целевая переменная представляет собой бинарную или категориальную метку завершенного экземпляра процесса. Продолжает этот вектор исследований работа Маджи и др. [5], в которой задача выявления возможных нарушений нормативных требований формализована через LTL-предикаты, применяемые к наблюдаемому префиксу последовательности событий. Проблематика прогнозирования нежелательных исходов также изучалась с использованием как структурированных, так и неструктурированных атрибутов экземпляра процесса [6]. В более позднем сравнительном исследовании Крача и др. [7] были проанализированы классические (Random Forest, XGBoost) и нейросетевые (LSTM, CNN) модели, показавшие сопоставимую эффективность при наличии достаточного объема обучающих данных.

Также задача прогнозирования следующего действия рассматривалась Эверманном и др. [8] с использованием рекуррентных нейронных сетей, а Камарго и др. [9] предложили расширенную LSTM-модель, одновременно предсказывающую следующую активность и соответствующую временную метку. Этот класс методов позволяет моделировать динамику поведения процесса, однако не охватывает оценку длительностей выполнения и фокусируется преимущественно на последовательностных аспектах.

Наиболее близкой к настоящему исследованию является задача прогноза остаточного времени цикла. В систематическом обзоре Веренича и др. [4] подчеркивается отсутствие единообразия в экспериментальных настройках: в разных работах используются разнородные наборы данных, метрики и схемы разбиения, что существенно осложняет объективное сравнение методов. Такс и др. [10] применили LSTM для прогноза остаточного времени и последовательности будущих действий, сосредоточившись на оценке единственного значения остаточного времени для каждого экземпляра процесса. В последующих работах Наварина и др. [11] и Полато и др. [12] подход был расширен за счет включения атрибутов экземпляра процесса, что позволило учитывать дополнительный контекст. Сендерович и др. [13] показали, что качество прогноза существенно зависит как от внутриэкземплярных, так и межэкземплярных признаков, влияющих на временную структуру процесса.

Адекватное представление временных характеристик событий является ключевым фактором качества моделей предиктивного мониторинга процессов. Каземи и др. [14]

предложили метод Time2Vec, реализующий дифференцируемое отображение скалярного значения времени в вектор, состоящий из одного линейного и нескольких синусоидальных компонентов с обучаемыми частотами и фазами. Данный метод обеспечивает инвариантность к сдвигу и корректно захватывает периодические паттерны, однако не отражает особенности межсобытийных интервалов со значительно варьирующейся длительностью, характерных для процессов с диапазоном задержек от минут до месяцев.

Циклические преобразования ($\sin/\cos$) часа суток и дня недели широко применяются в прогнозировании временных рядов [2, 15], однако отражают лишь ограниченный аспект темпоральной структуры событий. В то же время функции экспоненциального затухания, моделирующие убывающую «память» системы о предшествующих событиях, активно используются в моделях точечных процессов. Тем не менее в контексте моделей предиктивного мониторинга процессов и, в частности, при построении квантильных прогнозов такие представления временной структуры пока не получили систематического рассмотрения.

Лим и др. [15] в архитектуре TFT предложили поэлементный пропускной механизм с сигмоидной активацией, обеспечивающий взвешенный отбор входных признаков. Однако известно, что такие механизмы подвержены деградации при насыщении сигмоидной функции, когда выходные веса стремятся к нулю. Это приводит к фактическому затуханию пропускного механизма, т. е. подавлению проходящего через него сигнала [16].

В области предиктивного мониторинга процессов трансформерные архитектуры [17] пока не получили широкого распространения: большинство исследований опираются на рекуррентные модели [9, 10] или ансамбли деревьев решений [4]. При этом остается открытой задача разработки моделей, способных формировать совместный вероятностный прогноз нескольких контрольных точек в едином пространстве состояний и учитывать их взаимные зависимости, что требует механизма согласованного внимания между такими точками. Формализация и решение данной задачи представляют собой важные шаги к построению более информативных и интерпретируемых предиктивных систем.

Сформулированная выше задача требует модели, одновременно способной корректно кодировать межсобытийные интервалы с существенно варьирующейся длительностью [14, 15], формировать согласованный вероятностный прогноз нескольких контрольных точек с учетом их взаимных зависимостей [4, 10] и последовательно обновлять контекст по мере поступления новых событий [8, 9].

Адаптивный вероятностный трансформер

Указанные ограничения обусловили разработку адаптивного вероятностного трансформера типа «последовательность-в-вектор» (Adaptive Probabilistic Sequence-to-Vector Transformer, APS2V)¹, предназначенного для предиктивного мониторинга редакционного процесса. В отличие от методов, предсказывающих единственную скалярную характеристику, APS2V должен формировать согласованный многомерный прогноз, задающий совместное вероятностное распределение времени достижения ключе-

¹Исходный код. – URL: https://github.com/DmitriySyarov/OJS_timing (дата обращения: 10.03.2026).

вых этапов редакционного цикла. Модель принимает на вход наблюдаемый префикс журнала событий рукописи, а на выходе возвращает обновленную оценку распределений, которая пересчитывается после каждого нового события. Общая структура архитектуры показана на рис. 1.

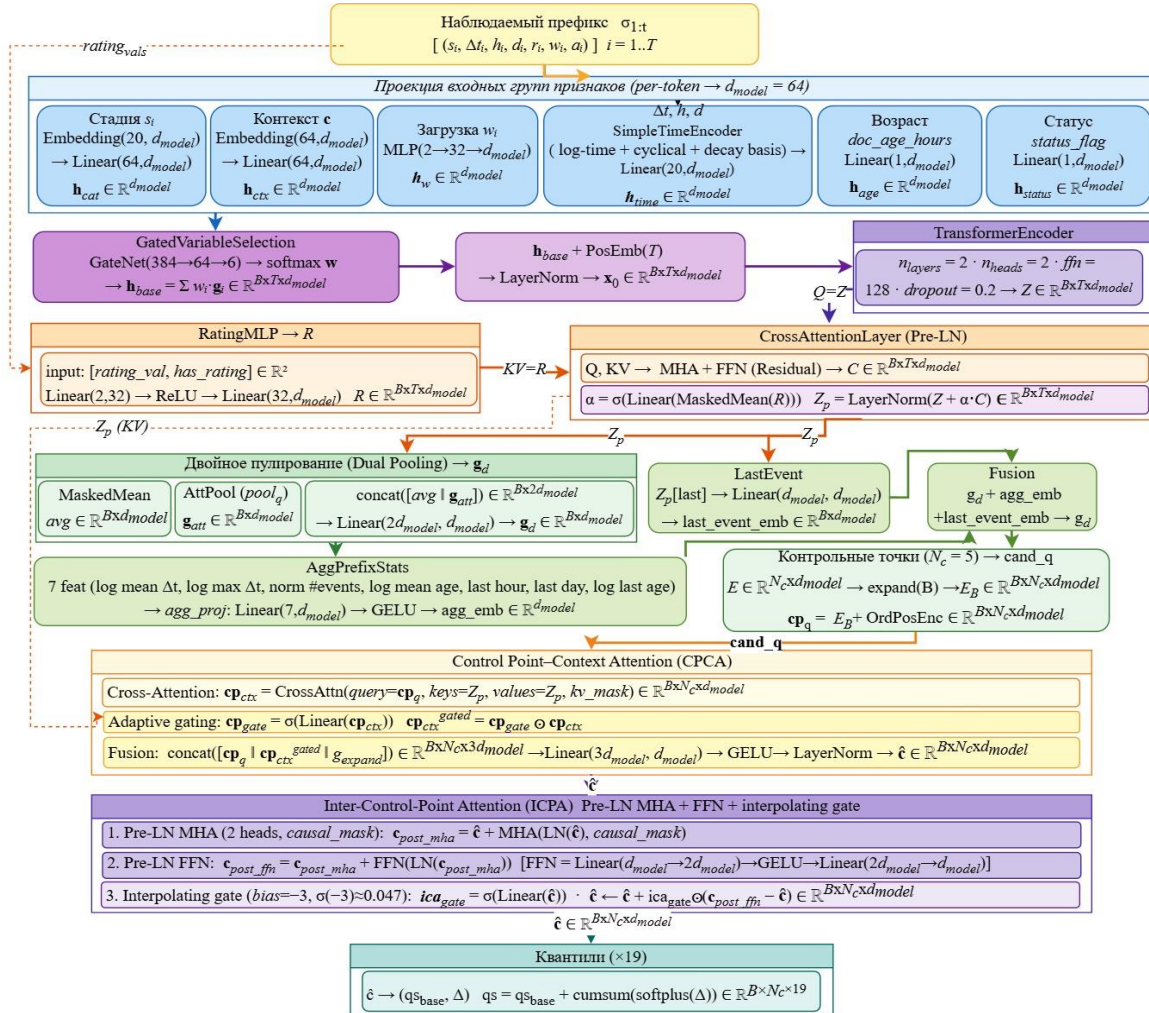


Рис. 1. Граф архитектуры APS2V

Fig. 1. APS2V Architecture Graph

В качестве входа APS2V использует экземпляр процесса в виде последовательности событий $\sigma = \langle e_1, e_2, \dots, e_n \rangle$, где каждое событие e_t характеризуется временной меткой $\tau_t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ и набором признаков $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^d$, а сама рукопись связана с контекстом издания c . Вектор признаков $\mathbf{x}_t$ соответствует кортежу $(s_t, \Delta t_t, h_t, d_t, r_t, w_t, a_t)$, включающему идентификатор стадии s_t , межсобытийный интервал $\Delta t_t = \tau_t - \tau_{t-1}$ (при $\Delta t_1 = 0$), час суток h_t , день недели d_t , числовую оценку рецензента r_t , показатель системной загрузки редакционной платформы w_t и возраст рукописи на момент события a_t .

По наблюдаемому префиксу $\sigma_{1:t} = \langle e_1, e_2, \dots, e_n \rangle$ требуется предсказать абсолютные длительности до пяти контрольных точек редакционного цикла, такие как начало рецензирования (rv), завершение рецензирования (rr), решение редактора (ed), плани-

рование публикации (ps) и публикация (pub). Соответствующий целевой вектор обозначим

$$\mathbf{y} = (y_{rv}, y_{rr}, y_{ed}, y_{ps}, y_{pub})^T \in \mathbb{R}^{N_c}, \quad (1)$$

где $N_c = 5$ – число контрольных точек редакционного цикла.

Выход модели задается не одним значением, а набором условных квантилей

$$\hat{\mathbf{y}}(q) = (\hat{y}_{rv}(q), \hat{y}_{rr}(q), \hat{y}_{ed}(q), \hat{y}_{ps}(q), \hat{y}_{pub}(q)), \quad (2)$$

где q принадлежит фиксированному множеству Q из 19 квантильных уровней в диапазоне от 0,02 до 0,98. Для каждой контрольной точки из множества N_c модель оценивает 19 условных квантилей, формируя матрицу прогнозов размерности $N_c \times |Q| = 5 \times 19$. Соответственно, выход модели имеет размерность $\hat{\mathbf{Y}} \in \mathbb{R}^{B \times N_c \times |Q|}$. Такое представление формирует согласованный вероятностный прогноз нескольких зависимых контрольных точек по наблюдаемому префиксу.

Для каждого события формируются шесть представлений размерности $d_{model} = 64$: стадии, контекста издания, системной загрузки, времени, статуса и возраста рукописи. Эти группы объединяются механизмом взвешенного отбора признаков, близким к блоку Gated Variable Selection из архитектуры TFT [15], но применяющим нормировку softmax [17] вместо независимых поэлементных пропускных механизмов с сигмоидной активацией:

$$\mathbf{w} = \text{softmax}(W_{gate} [\mathbf{g}^{(1)}; \dots; \mathbf{g}^{(6)}] + \mathbf{b}_{gate}) \in \mathbb{R}^6, \mathbf{h}_{base} = \sum_j w_j \mathbf{g}^{(j)}. \quad (3)$$

После добавления позиционных эмбеддингов представление $\mathbf{h}_{base}$ подается в двухслойный трансформерный энкодер [18], формирующий матрицу событийного контекста $Z \in \mathbb{R}^{B \times T \times d_{model}}$.

Параллельно пара признаков рецензирования [$rating_val$, has_rating] проецируется многослойным персептроном (англ. Multilayer Perceptron, MLP) в последовательность представлений $R \in \mathbb{R}^{B \times T \times d_{model}}$. Для интеграции редакционных оценок с событийным контекстом используется блок перекрестного внимания $C_{attn} = \text{CrossAttentionLayer}(Q = Z, KV = R)$, построенный на основе архитектуры Pre-LN Transformer. Блок включает операции предварительной нормализации, многоголового внимания (англ. Multi-Head Attention, МНА), остаточных соединений и последующей обработки посредством полносвязной сети прямого распространения (англ. Feed-Forward Network, FFN).

В последующие модули передается итоговое контекстуализованное представление C_{attn} , сформированное блоком перекрестного внимания. При этом матрица коэффициентов внимания используется только на этапе вычисления представления и не входит в дальнейший вычислительный граф модели. Для адаптивного согласования событийного контекста с информацией о рецензировании вычисляется коэффициент

$$\alpha = \sigma(\text{Linear}(\text{MaskedMean}(R))), \quad (4)$$

после чего формируется уточненное представление префикса

$$Z_p = \text{LayerNorm}(Z + \alpha \cdot C_{\text{attn}}). \quad (5)$$

Такое уточнение позволяет согласовать событийный контекст с информацией о рецензировании и передать более информативное описание состояния рукописи в последующие блоки.

Далее последовательность событий преобразуется в глобальное представление рукописи $\mathbf{g}_d$, формируемое путем агрегирования матрицы уточненного префиксного контекста Z_p с последующим дополнением агрегатными статистиками префикса и представлением последнего наблюдаемого события. На следующем этапе формируется множество из N_c контрольных точек, соответствующих прогнозируемым временным рубежам редакционного процесса. Для каждой контрольной точки строится запрос $\mathbf{cp}_q \in \mathbb{R}^{B \times N_c \times d_{\text{model}}}$: обучаемые эмбединги контрольных точек дополняются позиционным кодированием и проецируются в пространство признаков размерности d_{model} . Для построения контекстно-зависимых представлений контрольных точек используется механизм перекрестного внимания:

$$\mathbf{cp}_{\text{ctx}} = \text{CrossAttn}(\text{query} = \mathbf{cp}_q, \text{keys} = Z_p, \text{values} = Z_p). \quad (6)$$

В выражении (6) запросами выступают представления контрольных точек, а ключами и значениями – элементы наблюдаемого префикса процесса. Такой механизм перекрестного внимания (англ. Control Point-Context Attention, CPCA) обеспечивает построение специализированных представлений для каждой контрольной точки за счет избирательного применения информации из событийного контекста. В результате модель получает контекстно-зависимые описания различных этапов редакционного процесса, используемые для последующего прогнозирования их временных характеристик.

Представления, сформированные механизмом CPCA, дополнительно объединяются с исходными представлениями контрольных точек и глобальным дескриптором рукописи. Для этого контекстное представление после адаптивного взвешивания конкатенируется с запросом контрольной точки и глобальным дескриптором $\mathbf{g}_d$, после чего применяется линейное преобразование, нелинейность GELU и нормализация слоя:

$$\hat{\mathbf{c}} = \text{LayerNorm}\left(\text{GELU}\left(\text{Linear}\left([\mathbf{cp}_q \parallel \mathbf{cp}_{\text{ctx}}^{\text{gated}} \parallel \mathbf{g}_d]\right)\right)\right) \in \mathbb{R}^{B \times T \times d_{\text{model}}}. \quad (7)$$

Таким образом, каждая контрольная точка получает собственное контекстно-зависимое представление, отражающее ее связь как с глобальным состоянием рукописи, так и с наблюдаемым префиксом событий.

Для моделирования взаимных зависимостей между контрольными точками используется межточечный трансформерный модуль (англ. Inter-Control-Point Attention, ICSPA), который последовательно применяет к представлениям $\hat{\mathbf{c}}$ механизм МНА с каузальной маской и предварительной нормализацией слоя (англ. Pre-Layer Normalization, Pre-LN), за которым следует полносвязный блок FFN. Каузальная маска обеспечивает передачу информации от более ранних контрольных точек к более поздним, что соответствует причинно-следственной структуре редакционного процесса.

Финальное обновление выполняется посредством адаптивного механизма взвешивания:

$$\mathbf{ica}_{gate} = \sigma(\text{Linear}(\hat{\mathbf{c}})), \hat{\mathbf{c}} \leftarrow \hat{\mathbf{c}} + \mathbf{ica}_{gate} \odot (\mathbf{c}_{post_ffn} - \hat{\mathbf{c}}). \quad (8)$$

Описанная схема обеспечивает согласованное моделирование взаимосвязей между ранними и поздними этапами процесса, позволяя модели учитывать порядок следования ключевых точек и усиливать релевантные связи.

Формирование вероятностного прогноза осуществляется на основе представлений контрольных точек, полученных после блока ICSPA. Выходной слой генерирует для каждой контрольной точки набор квантильных оценок, соответствующих уровням из множества Q и образующих согласованный вероятностный прогноз. Для обеспечения монотонного упорядочения квантилей используется специальная параметризация выходного слоя, предотвращающая пересечение соседних квантильных оценок.

Данные, обучение и интеграция

Модель обучалась на журнале событий, сформированном по данным редакционного документооборота систем OJS Белорусского государственного университета². До разбиения на выборки исходный набор включал 2568 экземпляров процесса (74 320 зарегистрированных событий). Медианная длина последовательности событий составляла 29 событий (при диапазоне от 3 до 131), что отражает высокую вариативность жизненного цикла рукописей. Все встречающиеся обозначения стадий были приведены к унифицированному словарю из 20 токенов. Наиболее частотными оказались «подача рукописи» (submissionSubmitted), «действия с файлами» (fileUploaded/Revised), «назначение рецензента» (reviewerAssigned) и «решение редактора» (log.editor.decision).

Обучение выполнялось посредством минимизации суммы квантильных потерь (англ. pinball loss), аппроксимирующих метрику непрерывной ранговой вероятностной меры (англ. Continuous Ranked Probability Score, CRPS) [18], с добавлением штрафного члена, обеспечивающего монотонность квантилей:

$$L_{total} = \frac{1}{N \cdot 5 \cdot K} \sum_{n,c,k} p_{q_k}(y_{n,c} - \hat{y}_{n,c}(q_k)) + \lambda \sum_{k=1}^{K-1} \max(0, \hat{y}(q_k) - \hat{y}(q_{k+1})). \quad (9)$$

Целевые метки для контрольных точек определялись по временным отметкам соответствующих редакционных действий. Эмпирические распределения длительностей

²Набор данных APS2V-OJS (dataset_inspect.csv). – URL: <https://w3.bsu.by/index.php/catalog/5> (дата обращения: 10.03.2026).

характеризуются высокой вариабельностью и выраженной асимметрией: медианное время до начала рецензирования составляет около 196 ч (8 сут) при 90-м перцентиле 1756 ч, тогда как для публикации эти значения равны 2361 и 5960 ч соответственно. Значительный разброс временных интервалов делает задачу вероятностного прогнозирования более обоснованной по сравнению с использованием точечных оценок и приводит к высоким абсолютным значениям метрики CRPS, измеряемым сотнями часов. Для повышения численной устойчивости обучения целевые длительности масштабировались делением на 1000. Поскольку исходные интервалы измеряются в часах и находятся в диапазоне от 3 до 5960 ч, такое преобразование уменьшает диапазон целевой переменной приблизительно с $[0; 6000]$ до $[0; 6]$, сохраняя относительные различия между наблюдениями и упрощая оптимизацию квантильного регрессора.

Отфильтрованный набор данных был разделен на обучающую (2028 завершенных рукописей) и валидационную (507 рукописей) выборки в соотношении 80/20 со стратификацией по идентификатору издания при фиксированном значении генератора случайных чисел 42. Из каждой обучающей трассы длиной n событий формировались обучающие примеры методом выборки префиксов, длина которых равномерно распределялась на интервале $[1, n - 1]$. Такой подход обеспечивал обучение модели на различных стадиях редакционного процесса. В качестве методов регуляризации использовались событийное прореживание (вероятность 0,15) и случайное исключение нейронов (dropout) с вероятностью 0,2.

Размер предложенного варианта модели составляет $\approx 263\,000$ обучаемых параметров ($d_{model} = 64$). Компактность архитектуры позволила исключить необходимость применения GPU: обучение выполнялось на шестиядерном CPU (AMD Ryzen 5 7535HS, 32 ГБ ОЗУ) и занимало порядка 2 с на эпоху.

Обучение проводилось с использованием оптимизатора AdamW с шагом $2 \cdot 10^{-4}$ и весовым затуханием $5 \cdot 10^{-4}$ в течение 150 эпох (общее время ≈ 5 мин). Применялись косинусное расписание обучения (с разогревом пять эпох) и механизм ранней остановки (patience = 20) по метрике CRPS. В рассматриваемом эксперименте критерий ранней остановки не был достигнут и обучение продолжалось до установленного лимита в 150 эпох, а лучшая валидационная метрика была получена на последней эпохе. Для стабилизации весов использовалось экспоненциальное скользящее среднее (ЕМА) с коэффициентом 0,995. Динамика обучения показана на рис. 2. Полный состав входных признаков, используемых моделью, приведен в табл. 1.

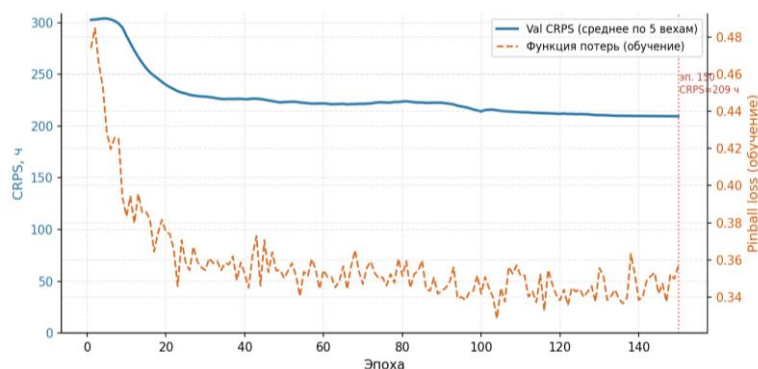


Рис. 2. Динамика обучения APS2V

Fig. 2. APS2V Learning Dynamics

Таблица 1
Входные признаки лога событийTable 1
Event log input features

Категория признаков <i>Category of features</i>	Признак <i>Sign</i>	Описание <i>Description</i>
Статусные	Идентификатор стадии	Категориальный признак события процесса
Статусные	Флаг состояния рукописи	Бинарный индикатор текущего статуса
Временные	Межсобытийная динамика	Логарифм межсобытийного интервала, циклические координаты часа суток и дня недели, а также набор экспоненциальных временных базисов
Редакционные	Оценка рецензента	Нормализованная оценка и бинарный индикатор ее наличия
Контекстные	Возраст рукописи	Логарифм суммарного времени с момента первичной подачи
Контекстные	Системная загрузка	Количество других активных рукописей в текущий момент
Контекстные	ID издания	Категориальный идентификатор журнала или конференции OJS

Точность прогнозирования

Для позиционирования APS2V относительно типичных методов предиктивного мониторинга было проведено сравнение с двумя базовыми моделями: рекуррентной нейронной сетью LSTM и ансамблем градиентного бустинга (GBM). Обе модели обучались и оценивались на одном и том же разбиении данных, описанном в предыдущем разделе. С целью обеспечения воспроизводимости результатов все эксперименты проводились при фиксированном значении начального состояния генератора псевдослучайных чисел ($\text{seed} = 42$). Для оценки устойчивости полученных результатов к стохастической составляющей процедуры обучения были дополнительно проведены контрольные эксперименты без фиксации генератора случайных чисел. Полученные в их рамках результаты демонстрируют соответствие основным выводам исследования и позволяют исключить случайный характер наблюдаемых различий. Оценка качества выполнялась по метрике CRPS с использованием единой сетки из 19 квантилей. Сравнение проводилось для нескольких долей наблюдаемой трассы (10, 40 и 90 %), что позволило проанализировать поведение моделей на ранних, промежуточных и поздних стадиях редакционного процесса.

Модель LSTM представляет собой двухслойную рекуррентную нейронную сеть со скрытым состоянием размерности 64 и многоквантильным выходным слоем. На вход модели подается тот же набор признаков, что и в случае предложенной архитектуры (стадия процесса, логарифмическая дельта, циклические признаки часа и дня недели, рейтинг, возраст рукописи, загрузка), однако в отличие от нее модель LSTM не содержит специализированного модуля временного кодирования и механизмов внимания. Процедура обучения предусматривала раннюю остановку по метрике CRPS на валидационной выборке при максимальном числе эпох, равном 150. Фактически обуче-

ние было завершено досрочно на 60-й эпохе ввиду отсутствия дальнейшего улучшения качества модели.

Модель GBM обучалась по схеме «отдельная модель на каждую контрольную точку × каждый квантиль» (95 моделей) на агрегированных признаках префикса: числе событий, статистиках дельт (среднее, дисперсия, максимум), возрасте рукописи, циклических признаках последнего события, счетчиках стадий и загрузке контекста. Использовался алгоритм градиентного бустинга для квантильной регрессии (200 деревьев, глубина четыре, скорость обучения 0,1). Результаты тестирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение моделей на валидационной выборке

Table 2

Comparison of models on the validation sample

Префикс Prefix, %	Модель Model	Начало рецензирования Start of review	Завершение рецензирования Completion of review	Решение редакции Editorial decision	План публикации Publication plan	Публикация Publication	Среднее Average
10	GBM	162,0	284,6	370,4	542,0	530,6	377,9
10	LSTM	175,5	306,6	419,8	589,7	578,2	414,0
10	APS2V	153,3	260,8	334,0	488,6	483,1	344,0
40	GBM	103,3	164,2	222,5	407,1	407,1	260,8
40	LSTM	78,2	260,5	160,2	515,5	502,1	303,3
40	APS2V	80,8	148,4	72,2	369,8	376,0	209,5
90	GBM	–	–	–	1094,0	276,2	685,1
90	LSTM	0,0	0,0	0,0	1373,7	708,9	1041,3
90	APS2V	0,0	0,0	0,0	588,0	764,2	676,1

Анализ вероятностных свойств

Результаты экспериментов показывают, что качество прогнозирования существенно зависит как от выбранной контрольной точки, так и от объема доступной информации о процессе. На ранних стадиях редакционного цикла наибольшей предсказуемостью характеризуются события начала и завершения рецензирования, тогда как для контрольных точек, связанных с планированием публикации и фактической публикацией, значения CRPS оказываются заметно выше. Данная закономерность согласуется с увеличением неопределенности по мере прохождения рукописью последовательности редакционных процедур и накопления влияния внешних факторов, не отраженных непосредственно в журнале событий.

Анализ вероятностных характеристик модели показал, что для широких прогнозных интервалов эмпирическое покрытие остается близким к номинальному уровню либо незначительно превышает его, тогда как для более узких интервалов наблюдается умеренное недопокрытие. Вместе с тем частота нарушений монотонности квантильных оценок остается низкой и не превышает 2,62 % даже для наиболее распространенных контрольных точек. Это подтверждает практическую согласованность формируемых вероятностных прогнозов и эффективность используемой монотонной параметризации квантильных выходов.

Абляционный анализ показал, что наибольший вклад в итоговое качество модели вносят механизм СРСА, обеспечивающий взаимодействие между контрольными точками и наблюдаемым префиксом процесса, и межточечный трансформерный модуль ИСРА, моделирующий зависимости между прогнозируемыми контрольными точками. Исключение каждого из этих компонентов приводит к наиболее заметному росту значений CRPS, что подтверждает их ключевую роль в формировании согласованных вероятностных прогнозов. Напротив, использование более сложного временного кодирования не обеспечило улучшения качества и сопровождалось увеличением среднего значения CRPS, вследствие чего данный компонент не был включен в финальную версию архитектуры.

Сравнение с базовыми моделями демонстрирует преимущество APS2V на различных стадиях наблюдения процесса. При использовании префикса длиной 10 % от полной трассы APS2V достигает среднего значения CRPS 344,0 ч против 377,9 ч для GBM и 414,0 ч для LSTM. Наиболее выраженное превосходство наблюдается при длине префикса 40 %, где средний CRPS составляет 209,5 ч по сравнению с 260,8 и 303,3 ч соответственно. Для поздних стадий процесса (90 % длины трассы) преимущество APS2V сохраняется: среднее значение CRPS для оставшихся активных контрольных точек составляет 676,1 ч против 685,1 ч у GBM и 1041,3 ч у LSTM. Следует отметить, что при данной длине префикса события начала рецензирования, завершения рецензирования и принятия редакционного решения для большинства рукописей уже относятся к наблюдаемой части трассы. Поэтому сравнение моделей на этапе 90 % фактически характеризует качество прогнозирования двух поздних контрольных точек. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная архитектура эффективно использует информацию о динамике процесса как при ограниченной, так и при практически полной наблюдаемости трассы.

Для оценки возможного влияния временной утечки данных дополнительно проведены эксперименты с хронологическим разделением выборки, при котором первые 80 % рукописей по времени поступления использовались для обучения, а последние 20 % – для валидации. В данном сценарии абсолютные значения CRPS ожидаемо возросли для всех моделей (табл. 3), однако APS2V сохраняет наилучшее качество прогнозирования (285,4 ч против 301,5 ч для XGBoost и 352,7 ч для LSTM). Это позволяет заключить, что наблюдаемое преимущество APS2V не является следствием временного перекрытия экземпляров между обучающей и валидационной выборками.

Таблица 3
Сравнение моделей на валидационной выборке

Table 3
Comparison of models on the validation sample

Модель Model	Начало рецензирования Start of review	Завершение рецензирования Completion of review	Решение редакции Editorial decision	План публикации Publication plan	Публикация Publication	Среднее Average
GBM	325,0	157,6	210,5	409,0	405,2	301,5
LSTM	298,7	243,9	261,9	481,3	477,8	352,7
APS2V	319,9	149,5	171,0	393,3	393,3	285,4

Ключевым преимуществом APS2V по сравнению с LSTM и GBM является использование единой вероятностной архитектуры, формирующей согласованные прогнозы одновременно для всех контрольных точек процесса. Механизмы CPSCA и ICSPA позволяют учитывать как связь контрольных точек с наблюдаемым префиксом, так и зависимости между прогнозируемыми событиями. Архитектура поддерживает последовательное уточнение прогнозов по мере поступления новых данных и допускает расширение множества контрольных точек без принципиального изменения структуры модели. Эти свойства делают APS2V перспективным инструментом для задач предиктивного мониторинга и имитационного моделирования редакционных процессов.

Ограничения исследования

Проведенное исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации полученных результатов. Во-первых, модель обучалась и оценивалась на данных журналов событий одного домена, что ограничивает переносимость выводов на другие редакционные платформы и предметные области. Во-вторых, объем выборки (2568 завершенных рукописей) остается относительно небольшим для трансформерных архитектур, вследствие чего дальнейшее расширение набора данных может способствовать повышению качества прогнозирования. В-третьих, основная серия экспериментов проводилась на стратифицированном разбиении данных по экземплярам рукописей. Дополнительная проверка на хронологическом разделении выборки подтвердила устойчивость полученных результатов, однако дальнейшая валидация на независимых временных интервалах представляет практический интерес.

Анализ вероятностных характеристик показал, что модель обеспечивает удовлетворительную согласованность квантильных прогнозов и низкую частоту нарушений их монотонности. Вместе с тем для узких прогнозных интервалов сохраняется тенденция к недопокрытию, что указывает на перспективность дальнейшего развития методов калибровки вероятностных распределений и оценки неопределенности.

Заключение

В настоящей работе формализована и решена задача совместного вероятностного мониторинга многоэтапных бизнес-процессов на примере прогнозирования длительностей стадий редакционного документооборота. Предложенная архитектура APS2V формирует согласованные вероятностные оценки времени достижения нескольких контрольных точек процесса. Это позволяет учитывать взаимосвязи между этапами редакционного цикла и получать более информативное представление о неопределенности будущего развития процесса.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование механизма перекрестного внимания совместно с межточечным трансформерным модулем оказывается более эффективным по сравнению с независимым прогнозированием отдельных контрольных точек. Совместное моделирование зависимостей между прогнозируемыми событиями позволяет учитывать структуру развития экземпляра процесса и формировать более точные вероятностные прогнозы на различных стадиях наблюдения.

2. Применение адаптивного пропускного механизма для интеграции гетерогенных признаков позволяет модели динамически регулировать вклад событийного контекста, информации о рецензировании и агрегированных характеристик процесса. Такой подход повышает устойчивость модели к вариативности и неполноте данных, характерным для журналов событий редакционных систем.

3. Экспериментальные результаты подтверждают перспективность использования единой трансформерной архитектуры для задач предиктивного мониторинга. В отличие от ансамблей независимых моделей и классических рекуррентных сетей APS2V обеспечивает согласованное вероятностное прогнозирование нескольких контрольных точек в рамках одной модели и допускает последовательное обновление прогнозов по мере поступления новых событий. Это делает предложенный подход перспективным для использования в задачах имитационного моделирования и анализа редакционных бизнес-процессов.

В перспективе предложенный подход отходит от парадигмы реактивного анализа логов. Дальнейшее развитие данного направления связано с разработкой методов постобработки и калибровки квантилей для узких интервалов, а также адаптацией предложенных механизмов внимания для задач оперативной оптимизации распределения ресурсов в реальном времени.

References

1. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*, 2nd ed. Berlin, Springer, 2018, 527 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4>.
2. Aalst W. M. P. van der. *Process Mining: Data Science in Action*, 2nd ed. Berlin, Springer, 2016, 467 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4>.
3. Verenich I., Dumas M., La Rosa M., Maggi F. M., Teinemaa I. Survey and cross-benchmark comparison of remaining time prediction methods in business process monitoring. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2019, vol. 10, iss. 4, pp. 1–34. <https://doi.org/10.1145/3331449>.
4. Teinemaa I., Dumas M., La Rosa M., Maggi F. M. Outcome-oriented predictive process monitoring: review and benchmark. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 1–57. <https://doi.org/10.1145/3301300>.
5. Maggi F. M., Di Francescomarino C., Dumas M., Ghidini C. Predictive monitoring of business processes. *Advanced Information Systems Engineering: 26th International Conference, CAiSE 2014, Thessaloniki, Greece, 16–20 June 2014*, pp. 457–472 (Lecture Notes in Computer Science; vol. 8484). https://doi.org/10.1007/978-3-319-07881-6_31.
6. Teinemaa I., Dumas M., Maggi F. M., Di Francescomarino C. Predictive business process monitoring with structured and unstructured data. *Business Process Management: 14th International Conference, BPM 2016, Rio de Janeiro, Brazil, 18–22 September 2016*, pp. 401–417 (Lecture Notes in Computer Science; vol. 9850). https://doi.org/10.1007/978-3-319-45348-4_23.
7. Kratsch W., Manderscheid J., Röglinger M., Seyfried J. Machine learning in business process monitoring: A comparison of deep learning and classical approaches used for outcome prediction. *Business & Information Systems Engineering*, 2021, vol. 63, iss. 3, pp. 261–276. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00645-0>.
8. Evermann J., Rehse J.-R., Fettke P. Predicting process behaviour using deep learning. *Decision Support Systems*, 2017, vol. 100, pp. 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.04.003>.

9. Camargo M., Dumas M., González-Rojas O. Learning accurate LSTM models of business processes. *Business Process Management: 17th International Conference, BPM 2019, Vienna, Austria, 1–6 September 2019*, pp. 286–302 (Lecture Notes in Computer Science; vol. 11675). https://doi.org/10.1007/978-3-030-26619-6_19.
10. Tax N., Verenich I., La Rosa M., Dumas M. Predictive business process monitoring with LSTM neural networks. *Advanced Information Systems Engineering: 29th International Conference, CAiSE 2017, Essen, Germany, 12–16 June 2017*, pp. 477–492 (Lecture Notes in Computer Science; vol. 10253). https://doi.org/10.1007/978-3-319-59536-8_30.
11. Navarin N., Vincenzi B., Polato M., Sperduti A. LSTM networks for data-aware remaining time prediction of business process instances. *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Honolulu, HI, USA, 27 November – 01 December 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1711.03822> (accessed 10.03.2026). <https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285184>.
12. Polato M., Sperduti A., Burattin A., de Leoni M. Time and activity sequence prediction of business process instances. *Computing*, 2018, vol. 100, iss. 9, pp. 1005–1031. <https://doi.org/10.1007/s00607-018-0593-x>.
13. Senderovich A., Di Francescomarino C., Ghidini C., Jorbina K., Maggi F. M. Intra and inter-case features in predictive process monitoring: A tale of two dimensions. *Business Process Management: 15th International Conference, BPM 2017, Barcelona, Spain, 10–15 September 2017*, pp. 306–323 (Lecture Notes in Computer Science; vol. 10445). https://doi.org/10.1007/978-3-319-65000-5_18.
14. Kazemi S. M., Goel R., Eghbali S., Ramanan J., Sahota J., ..., Brubaker M. *Time2Vec: Learning a vector representation of time*, 2019. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1907.05321> (accessed 10.03.2026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.05321>.
15. Lim B., Arik S. Ö., Loeff N., Pfister T. Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 2021, vol. 37, iss. 4, pp. 1748–1764. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.03.012>.
16. Shazeer N., Mirhoseini A., Maziarz K., Davis A., Le Q., Hinton G., Dean J. Outrageously large neural networks: The sparsely-gated mixture-of-experts layer. *5th International Conference on Learning Representations, ICLR 2017, Toulon, France, 24–26 April 2017*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1701.06538> (accessed 10.03.2026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.06538>.
17. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., ..., Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2017, vol. 30, pp. 6000–6010. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.
18. Gneiting T., Raftery A. E. Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 2007, vol. 102, no. 477, pp. 359–378. <https://doi.org/10.1198/016214506000001437>.
19. Gorishniy Y., Rubachev I., Khrulkov V., Babenko A. Revisiting deep learning models for tabular data. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2021, vol. 34, pp. 18932–18943. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.11959>.

Информация об авторе

Сьянов Дмитрий Андреевич, старший преподаватель кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования, Белорусский государственный университет.
E-mail: syanov@bsu.by
<https://orcid.org/0009-0004-5347-8806>

Information about the author

Dmitry A. Syanov, Senior Lecturer, Department of Web Technologies and Computer Modeling, Belarusian State University.
E-mail: syanov@bsu.by
<https://orcid.org/0009-0004-5347-8806>

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ

SCIENTISTS OF BELARUS

Абламейко Сергей Владимирович
(к 70-летию со дня рождения)

Ablameyko Sergey Vladimirovich
(on the 70th anniversary of his birth)



24 сентября 2026 г. выдающемуся белорусскому ученому, академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования механико-математического факультета БГУ, главному научному сотруднику отдела интеллектуальных информационных систем ОИПИ НАН Беларуси Сергею Владимировичу Абламейко исполняется 70 лет.

Сергей Владимирович Абламейко – белорус, родился в 1956 г. в г. п. Вороново Гродненской области. В 1978 г. окончил БГУ по специальности «Математика». С 1978 по 2008 г. работал в Институте технической кибернетики АН БССР (с 2002 г. – ОИПИ НАН Беларуси) в должности стажера-исследователя, аспиранта, младшего научного сотрудника, старшего научного сотрудника, с 1986 г. – заведующего лабораторией, с 1998 г. – заместителя директора, в 2002–2008 гг. – генерального директора. С 2005 по 2012 г. – академик-секретарь Отделения физики, математики и информатики НАН Беларуси. Одновременно с 1989 г. – доцент, затем профессор БГУ (по совместительству). С октября 2008 г. по сентябрь 2017 г. – ректор БГУ. С сентября 2017 г. – профессор кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования механико-математического факультета БГУ.

В 1984 г. С. В. Абламейко защитил кандидатскую диссертацию, в 1990 г. – докторскую диссертацию. В 1992 г. присвоено ученое звание профессора. В 2004 г. избран членом-корреспондентом НАН Беларуси, в 2009 г. – академиком.

С. В. Абламейко является крупным специалистом в области информационных технологий, обработки изображений, распознавания образов и геоинформационных систем, внес фундаментальный вклад в развитие теории и алгоритмов компьютерной обработки изображений. Под его руководством разработаны уникальные методы анализа и распознавания графической информации, нашедшие свое применение в различных высокотехнологичных отраслях. Фундаментальные результаты, полученные в данной области, приобрели широкую известность. На этой основе в Беларуси сформировалась сильная научная школа, получившая международное признание.

С. В. Абламейко внес значительный вклад в развитие информатики в Республике Беларусь. Под его научным руководством в 2002–2008 гг. созданы суперкомпьютеры СКИФ, получившие широкое мировое признание, выполнены российско-белорусские

космические программы и создана первая очередь Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли.

С. В. Абламейко опубликовал более 750 научных работ, включая 30 книг и 50 сборников трудов под его редакцией. Книги С. В. Абламейко изданы в США, Великобритании, Нидерландах, Польше и других странах. Его труды имеют высокий уровень признания в международном и отечественном научном сообществе (согласно данным профилей в наукометрических базах):

Scopus – 188 публикаций с общим числом цитирований 988, индекс Хирша 13;

Web of Science – 128 публикаций с общим числом цитирований свыше 450, индекс Хирша 10;

РИНЦ – 543 публикаций с общим числом цитирований 2069, индекс Хирша 19.

Наиболее цитируемые работы Сергея Владимировича сосредоточены на следующих приоритетных направлениях современной информатики: теория, методы и алгоритмы обработки изображений; системы распознавания образов и анализа видеопоследовательностей; применение геоинформационных систем и веб-технологий.

Под его руководством и при его консультировании защищено 13 кандидатских диссертаций и 4 докторские диссертации.



После вручения Государственной премии Республики Беларусь, 2003



Руководство IAPR, Гонконг, 2006



Заседание Совета Евразийской ассоциации университетов, БГУ, 2014

С. В. Абламейко был председателем и сопредседателем более 70 международных конференций, проходивших в Германии, Италии, Польше, России, Беларуси, и членом программных комитетов более 150 международных конференций.

С. В. Абламейко – главный редактор журналов: *Journal of Superintelligence and Computing, China* (с 2025), *Journal of Artificial Intelligence and Digital Health, China* (с 2023), *Journal of Science and Technology, Binh Duong University, Vietnam* (с 2018), член редколлегий многих международных журналов, издаваемых в Европе, США и России, и белорусских журналов: «Доклады НАН Беларуси», «Известия НАН Беларуси. Серия физико-математических наук», «Информатика» (ОИПИ НАН Беларуси) и др.

Был членом Президиума НАН Беларуси (2005–2018), Президиума Республиканского совета ректоров (2008–2017), Президиума Евразийской ассоциации университетов (2008–2017), коллегии Министерства образования Республики Беларусь (2015–2018), председателем совета специального фонда Президента Республики Беларусь по социальной поддержке одаренных учащихся и студентов (2014–2017), вице-президентом Евразийской ассоциации университетов (2015–2017). Председатель совета по защите докторских диссертаций при БГУ (с 2010 г.).

В 1998 г. за большой вклад в развитие теории обработки изображений С. В. Абламейко первым из ученых стран СНГ и Восточной Европы избран главным членом (Fellow) Международной ассоциации по распознаванию образов (IAPR). В 2004–2006 гг. был вице-президентом, а в 2006–2008 гг. – первым вице-президентом IAPR. Никогда в руководстве этой авторитетной международной ассоциации не было ученого из стран Восточной и Центральной Европы. Избран главным членом (Fellow) Британского института инженеров по электротехнике (ИЕЕ) (1995), старшим членом (Senior Member) Американского института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) (1995), инженером по Хартии (Chartered Engineer) Инженерным Советом Европы (2001), членом Азиатско-Тихоокеанской ассоциации искусственного интеллекта (2021), членом Международной академии основных наук и гуманитарных дисциплин (2024).

Был вице-президентом Азиатско-Тихоокеанской ассоциации искусственного интеллекта (2021–2025), в настоящее время является вице-президентом Международной академии наук об искусственном интеллекте (с 2025 г.).

Почетный профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (2014), Гродненского государственного университета им. Янки Купалы, Беларусь (2012), Далянского политехнического университета, Китай (2013), Университета Бинь Зыонг, г. Хошимин, Вьетнам (2014), Белградского Альфа БК университета, Сербия (2016), Китайского университета нефти, Восточный Китай (2023), Северо-Западного политехнического университета, Китай (2024).

С. В. Абламейко является академиком (действительным членом) Европейской академии (2011), Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского (2012), Российской академии естественных наук (2015), Испанской королевской академии докторов (2009), Европейской академии экономики и управления (2010), Белорусской инженерной академии, Минск (1995), Международной академии наук информации, информационных процессов и технологий, Москва (1995), Испанской королевской академии экономики и финансов (2016) и ряда других академий.

Сергей Владимирович – научный руководитель и председатель научно-технического совета ряда государственных программ научных исследований. Научный руководитель Государственной программы научных исследований «Информатика и космос» (2011–2015). Научный руководитель российско-белорусских программ «Космос-БР» (2002) (зам. научного руководителя – 1999–2002 гг.), «Космос-СГ» (2004–2007), «Космос-НТ» (2008–2010), «Суперкомпьютеры СКИФ» (2002–2004), «СКИФ-Грид» (2007–2010). Являлся руководителем многих международных проектов по программам КОПЕРНИКУС, INTAS, МНТЦ. Был заместителем научного руководителя работ по созданию многофункциональной космической системы Союзного государства (2008–2010 гг.).

С. В. Абламейко был ученым секретарем (1999–2003) и с 2003 по 2012 г. – заместителем председателя Национального совета по космосу Республики Беларусь. Член Комиссии по вопросам государственной научно-технической политики при Совете Министров Республики Беларусь, Совета по информатизации при Президенте Республики Беларусь и ряда других научных советов. В 2006–2008 гг. был руководителем работ по созданию Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли.

С. В. Абламейко – заслуженный деятель науки Республики Беларусь (2017), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники (2003), премии Ленинского комсомола Белоруссии (1990), премии НАН Беларуси за лучшую монографию (1998), премии НАН Беларуси за лучшую научную работу (2007), совместной премии НАН Беларуси и Российской академии наук (2010) за создание суперкомпьютеров СКИФ.

За работы в области информационных технологий С. В. Абламейко награжден медалью Франциска Скорины (Государственная награда Республики Беларусь), орденом Дружбы народов (Государственная награда Российской Федерации), медалью Союзного государства «За сотрудничество», юбилейным знаком Союзного государства «10 лет со Дня единения народов Беларуси и России», знаками российского космического агентства «За заслуги в космонавтике», «За международное сотрудничество в области космонавтики», «За заслуги в организации космической деятельности», медалью Ю. А. Гагарина, медалью Г. С. Титова Федерации космонавтики России, юбилейной медалью российского космического агентства «50 лет космической эры», медалью «90 лет Государственному космическому научно-производственному центру им. М. В. Хруничева», медалью Военно-космических сил Российской Федерации «За выдающийся вклад в развитие космонавтики. Девяносто лет со дня рождения А. А. Максимова», юбилейной медалью «В честь 80-летия Национальной академии наук Беларуси», медалью «За вклад в евразийское сотрудничество» Евразийской ассоциации университетов, бронзовой медалью Норберта Винера и многими другими наградами. В 2006 г. ему присвоено звание «Почетный гражданин Вороновского района Гродненской области», его малой родины.

Правила для авторов

С подробной версией и примерами оформления можно ознакомиться на сайте журнала <http://inf.grid.by> при подаче статьи.

Параметры форматирования: основной текст – Times New Roman, кегль основного шрифта – 12 пт, кегль подрисовочных подписей и названия таблиц – 10 пт, междустрочный интервал – точно 15 пт, абзац – 1 см, поля – по 2,5 см со всех сторон, текст с переносами, формулы, рисунки, таблицы отбиваются пробелами от основного текста.

Тип статьи:	Объем	Аннотация	Количество литературных ссылок
Оригинальная	не больше 20 стр.	структурирована	не менее 10
Обзорная	не меньше 20 стр.	структурировать не надо	не более 30

Авторы статей о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны предоставить в редакцию акт экспертизы.

Титульная страница статьи:

УДК	Индекс по Универсальной десятичной классификации
Название на англ. и рус. языках	- не используются аббревиатуры; - без переносов
Сведения об авторах	- инициалы и фамилии всех авторов – на рус. языке; - имя, инициал и фамилия – на англ. языке; - e-mail ответственного лица; - полное наименование учреждений с указанием почтового адреса
Аннотация Abstract	- 150–250 слов; - включает подразделы: Цели / Objectives, Методы / Methods, Результаты / Results, Заключение / Conclusion; - аббревиатуры расшифровываются
Ключевые слова Keywords	- 5–10 слов и несложных словосочетаний; - нежелательно использовать аббревиатуры
Благодарности Acknowledgements	- признательность коллегам за помощь; - благодарность за финансовую поддержку
Конфликт интересов Conflict of interest	- информация о конфликте интересов. При отсутствии такового формулировка следующая: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Текст статьи:

Разделы и подразделы в тексте оформляются отдельной строкой полужирным очертанием.

Формулы, рисунки, таблицы в статье нумеруются в соответствии с порядком их упоминания в тексте, ссылки на них обязательны. Рисунки должны быть хорошего качества с четкими надписями и обозначениями. Цветные иллюстрации печатаются только в том случае, когда это необходимо для понимания излагаемого материала. Перевод подрисовочной подписи и пояснений к рисунку, а также перевод названия таблицы, заголовки строк или столбцов располагаются курсивом после русскоязычной версии. Для рисунков и таблиц указывается источник (ссылка на материалы других статей, составлено автором и др.).

Набор формул выполняется в формульном редакторе Math Type. Прямым шрифтом набираются: греческие и русские буквы; математические символы ($\sin$, $\lg$, ∞); символы химических элементов (C, Cl, CHCl₃); цифры (римские и арабские); индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращениями слов. Курсивом набираются латинские буквы, символы физических величин (в том числе и в индексе).

В статье обязателен раздел Вклад авторов, если автор не один.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1–2024). Номер литературной ссылки в тексте указывается по порядку. Ссылаться на неопубликованные работы не допускается. 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).

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.

В разделе Информация об авторах (Information about the authors) приводятся ФИО авторов полностью, ученая степень, звание, должность, название организации, ORCID (при наличии).

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.

Редакция оставляет за собой право на редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

ИНДЕКСЫ

00827

для индивидуальных
подписчиков

008272

для предприятий
и организаций

3 | 2026

ТОМ ■ VOL. 23

ИНФОРМАТИКА ■ INFORMATICS

ISSN 1816-0301 (Print)



9 771816 030000