

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

ИНФОРМАТИКА

INFORMATICS

TOM 23
VOL.

2 | 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, № 2, апрель-июнь 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, № 2, апрель-июнь 2026

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

Сдано в набор 28.05.2026. Подписано в печать 23.06.2026. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 12,8. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 40 экз. Заказ 4.

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. 2, April-June 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. 2, April-June 2026

Issue Head *Sviatlana S. Maiseichyk*

Editor *Halina B. Hancharenka*

Computer Imposition *Volha B. Butsevich*

Sent for press 28.05.2026. Output 23.06.2026. Format 60×84 1/8. Offset paper. Riesography.

Printed sheets 12,8. Publisher's signatures 10,0. Circulation 40 copies. Order 4.

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

- Труханович И. А., Парамонов А. И.** Исследование эффективности применения ансамблевых методов многоаспектного анализа текста в задачах категоризации..... 7
- Скакун В. В., Сюй Сылунь.** Предсказание центров ядер раковых клеток на иммуногистохимических флуоресцентных изображениях.....21

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Давыдовский А. Г., Кругликов С. В.** Проблема превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования..... 39
- Яскевич А. В., Чуйко В. А.** Разработка интеллектуальной системы планирования на основе персонального ассистента 68

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Bokun A. G.** Application of Tullock Contest Success Functions to transaction fee optimization in high-throughput networks 80

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

- Сидоренко А. В., Приходько И. А.** Квантовый блокчейн с интеграцией квантовой запутанности и алгоритма консенсуса..... 94

ИНФОРМАЦИЯ

- V Международный форум IT-Академграда «Искусственный интеллект в Беларуси»** 107
- XXV Международная научно-техническая конференция «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации» (РИНТИ-2026)** 109

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

CONTENTS

SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

- Trukhanovich I. A., Paramonov A. I.** Research on the effectiveness of using ensemble methods of multidimensional text analysis in categorization tasks 7
- Skakun V. V., Xu Silun.** Prediction of cancer cell nuclear centers in immunohistochemical fluorescence images..... 21

INFORMATION TECHNOLOGIES

- Davidovsky A. G., Kruglikov S. V.** The problem of preventive risk management in "smart communities" based on stochastic simulation 39
- Yaskevich A. V., Chuyko V. A.** Development of an intelligent scheduling system based on a personal assistant..... 68

MATHEMATICAL MODELING

- Bokun A. G.** Application of Tullock Contest Success Function to transaction fee optimization in high-throughput networks 80

INFORMATION PROTECTION AND SYSTEM RELIABILITY

- Sidorenko A. V., Prikhodko I. A.** Quantum blockchain based on integration of quantum entanglement and consensus algorithm 94

INFORMATION

- 5th International IT-Akademgrad Forum** "Artificial Intelligence in Belarus" 107
- 25th International Scientific and Technical Conference**
"Development of Informatization and the State System
of Scientific and Technical Information" (RINTI-2026) 109

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

УДК 004.89:004.912
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-7-20>

Поступила в редакцию | Received 12.03.2026
Подписана в печать | Accepted 03.04.2026
Опубликована | Published 30.06.2026

Исследование эффективности применения ансамблевых методов многоаспектного анализа текста в задачах категоризации

И. А. Труханович, А. И. Парамонов[✉]

✉E-mail: a.paramonov@bsuir.by

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Аннотация

Цели. Цель представленной работы – экспериментальное исследование эффективности применения ансамблевых методов для многоаспектного анализа текстов в задачах категоризации документов на примере идентификации авторства. Особое внимание уделяется сравнению классических алгоритмов машинного обучения, их ансамблей и разработанной гибридной квантово-классической модели.

Методы. В исследовании использованы метод опорных векторов, логистическая регрессия и случайный лес, а также ансамбль этих методов и гибридная модель авторской архитектуры. Предложенный гибридный подход сочетает синтаксический анализ на основе метода опорных векторов, семантический анализ с использованием трансформерной модели BERT и квантовый вариационный модуль. Эксперименты проводились на разных корпусах текстов на английском языке с варьированием по количеству авторов. Качество оценивалось по метрикам точности, полноты и F1-меры.

Результаты. В серии экспериментов с небольшим числом авторов все модели показали высокую точность, при этом гибридная модель достигла наилучших результатов (F1-мера до 82,5 %). В экспериментах с большим числом авторов наблюдалось закономерное снижение качества, однако гибридная модель продемонстрировала лучшую устойчивость, превосходя классические ансамбли на всех корпусах. Наиболее значимый прирост точности зафиксирован на сложном корпусе коротких текстов (блогов) с большим числом авторов.

Заключение. Разработанная авторами гибридная квантово-классическая модель подтвердила свою эффективность для задач авторской атрибуции и может быть масштабирована для более широкого круга задач категоризации документов, особенно в условиях высокой размерности признаков

и большого количества классов. Применение квантового модуля позволило выявить сложные нелинейные зависимости в данных, недоступные традиционным подходам. Полученные результаты открывают перспективы для практического использования предложенного подхода в системах анализа текстов, включая обработку коротких сообщений и обширные базы авторов. Дальнейшее развитие исследования связано с расширением набора признаков, оптимизацией архитектуры квантовых схем и адаптацией модели для работы в различных прикладных областях.

Ключевые слова: ансамблевые архитектуры, категоризация документов, идентификация авторства, стилометрия, квантовые компоненты, многоаспектный анализ, обработка текста

Для цитирования. Труханович, И. А. Исследование эффективности применения ансамблевых методов многоаспектного анализа текста в задачах категоризации / И. А. Труханович, А. И. Парамонов // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 7–20. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-7-20>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Research on the effectiveness of using ensemble methods of multidimensional text analysis in categorization tasks

Ilya A. Trukhanovich, Anton I. Paramonov✉

✉E-mail: a.paramonov@bsuir.by

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

Abstract

Objectives. The aim of the work is to experimentally investigate the effectiveness of ensemble methods for multidimensional text analysis in document categorization tasks using the example of authorship identification. Particular attention is paid to comparing classical machine learning algorithms, their ensembles, and the developed hybrid quantum-classical model.

Methods. The study uses support vector machines, logistic regression, and random forests, as well as an ensemble of these models and a hybrid model of the author's architecture. The proposed hybrid approach combines syntactic analysis based on the support vector method, semantic analysis using the BERT transformer model, and a quantum variational module. Experiments were conducted on different corpora of English texts with varying number of authors. Quality was assessed using accuracy, completeness, and F1-score metrics.

Results. In a series of experiments with a small number of authors, all models showed high accuracy, with the hybrid model achieving the best results (F1 score up to 82.5%). In experiments with a large number of authors, a regular decrease in quality was observed, but the hybrid model demonstrated better stability, outperforming classical ensembles on all corpora. The most significant increase in accuracy was recorded on a complex corpus of short texts (blogs) with a large number of authors.

Conclusion. The hybrid quantum-classical model developed by the authors has proven its effectiveness for author attribution tasks and can be scaled for a wider range of document categorization tasks, especially in conditions of high feature dimensionality and a large number of classes. The use of the quantum module made it possible to identify complex nonlinear dependencies in the data that are inaccessible to traditional approaches. The results obtained open up prospects for the practical use of the proposed approach in text analysis systems, including the processing of short messages and extensive author databases. Further development of the research is related to expanding the set of features, optimizing the architecture of quantum circuits, and adapting the model for use in various application areas.

Keywords: ensemble constructions, document categorization, authorship identification, stylometry, quantum components, multidimensional analysis, text processing

For citation. Trukhanovich I. A., Paramonov A. I. *Research on the effectiveness of using ensemble methods of multidimensional text analysis in categorization tasks*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 2, pp. 7–20 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-7-20>.

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

Введение

Классические модели машинного обучения, такие как метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM), логистическая регрессия и случайный лес, на протяжении долгого времени успешно применялись для решения прикладных задач категоризации. Несмотря на свою эффективность, эти методы часто ограничены анализом классических признаков, что может снижать точность на сложных и больших корпусах текстов. В ответ на эти ограничения в последнее время наблюдается рост интереса к ансамблевым подходам, позволяющим комбинировать преимущества различных моделей для повышения общей производительности. В работе [1] авторы ранее провели исследования возможности применения различных методов анализа текста для определения плагиата, а также предложили подходы по комбинированию методов в виде ансамбля для достижения более высокого уровня точности.

В числе перспективных исследований сегодня рассматривается направление, связанное с использованием глубокого семантического анализа текстов, который реализуется с помощью современных трансформерных моделей, например BERT. Эти модели способны извлекать более абстрактные смысловые представления, выходящие за рамки классических признаков, что особенно важно при работе с анонимными и многожанровыми текстами. В совокупности с классическими подходами на их основе можно создавать ансамблевые архитектуры, сочетающие синтаксический, семантический и статистический анализы.

С развитием квантовых вычислений формируется новый класс методов, который расширяет возможности анализа данных за счет использования квантовых вариационных схем [2]. Такие методы позволяют выявлять сложные нелинейные зависимости и скрытые паттерны в семантическом пространстве текстов, что недоступно традиционным алгоритмам. Объединение квантовых методов с классическими и семантическими моделями в составе единого ансамбля создает потенциально мощные инструменты для решения задач категоризации, в частности для авторской атрибуции.

Современные исследования демонстрируют, что комбинирование различных типов анализа может обеспечить более высокое качество категоризации документов, особенно в условиях анонимности и неструктурированности текстовых данных.

В работах [3, 4] авторы предлагают комплексный подход к задаче категоризации документов на основе многоаспектного анализа естественно-языковых текстов с учетом их различных особенностей. Предложенный подход основан на модификации ансамблевых методов машинного обучения с использованием различных слоев признаков и вычислительных моделей для их обработки.

В данной работе приведены некоторые результаты исследований эффективности предложенного многоаспектного анализа текстов в задачах категоризации документов.

Объекты исследования

В рамках исследования проведены серии экспериментов, в которых рассмотрены возможности ряда моделей машинного обучения для решения задачи идентификации авторства текстов на различных по своим характеристикам выборках корпусов документов. Были реализованы алгоритмы для таких моделей, как SVM, логистическая регрессия, случайный лес, а также для ансамбля первых трех классических моделей и ансамбля моделей с квантовым модулем (авторская архитектура).

Базовой линией при анализе текстов выступала *классическая модель на основе метода опорных векторов*, которая широко применяется и хорошо зарекомендовала себя в стилометрии [5]. Она строит гиперплоскость в пространстве признаков, оптимально разделяющую тексты разных авторов на основе группы синтаксических и лексических характеристик.

Логистическая регрессия представляет собой статистический классификатор, который моделирует вероятность принадлежности текста конкретному автору. Метод выбран по причине того, что эффективно используется при работе с большими признаковыми пространствами и хорошо интерпретируем.

Случайный лес представляет собой ансамбль решающих деревьев, который объединяет несколько моделей для повышения устойчивости и точности классификации. Он способен выявлять сложные нелинейные зависимости в данных за счет случайного выбора подмножеств признаков и образцов. Алгоритм выбран благодаря подтвержденной способности эффективно решать задачи классификации и регрессии, предлагая высокую точность и устойчивость к переобучению. В исследовании [6] показан высокий показатель эффективности данного алгоритма при решении задачи категоризации документов на сбалансированных выборках.

В качестве альтернативного алгоритма предложен *ансамбль классических моделей* в виде объединения прогнозов SVM, логистической регрессии и случайного леса. Такой ансамбль использует метод голосования или агрегирования для улучшения общего качества классификации по сравнению с отдельными моделями.

Ансамблевая модель с квантовым модулем представляет собой авторский инновационный подход, сочетающий в себе три ключевых компонента: синтаксическую модель SVM для анализа формальных признаков текста, семантическую модель BERT, способную извлекать глубокие смысловые представления, и квантовый вариационный модуль. Эта гибридная модель реализует многоаспектный анализ текстовых документов, архитектурные особенности которого описаны авторами в работах [3, 4].

Постановка экспериментов

В качестве исходных данных для формирования тестовой выборки для экспериментов используются несколько известных корпусов, которые представляют различные жанры и типы текстов на английском языке. Характеристики задействованных корпусов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Описание тестовых корпусов

Table 1

Description of text corpora

Корпус Corpus	Количество текстов на автора Number of texts per author	Тип текстов Type of texts	Особенности Peculiarities	Источник Source
Blog Authorship Corpus	35	Блоговые посты	Много авторов, короткие тексты, социальные медиа	Kaggle
Project Gutenberg	20+	Литература	Классическая литература	Project Gutenberg
Reuters 50/50	50	Новостные статьи	Сбалансированный кор- пус новостей с авторами	UCI Repository

Первый Blog Authorship Corpus включает блоги с большим числом авторов и короткими текстами, отражающими современную цифровую культуру¹. Второй корпус представлен Project Gutenberg, который содержит классическую литературу с разнообразными авторами и значительным текстовым массивом². Корпус Reuters 50/50 включает новостные статьи по финансовой тематике с явной разметкой авторов и сбалансированным количеством текстов на каждого из них³. Такой набор корпусов обеспечивает широкий охват и разнородность данных, что позволяет исследовать модели и методы при работе с текстами в разных жанрах – от неформальных блогов и литературных художественных произведений до формальных новостных текстов. Все это способствует более надежной оценке моделей и определению их универсальности.

Для оценки качества категоризации предлагается использовать такие метрики, как точность, полнота и мера F1.

Точность (accuracy) отражает долю правильно классифицированных текстов по сравнению с общим числом анализируемых. Эта метрика показывает, насколько часто модель правильно определяет автора текста в целом. Высокая точность свидетельствует о том, что модель хорошо справляется с задачей авторской атрибуции, минимизируя количество ошибок. Метрика удобна для быстрой оценки общей эффективности классификатора, но при несбалансированных данных может быть недостаточно информативной.

Полнота (recall) отражает способность модели находить все тексты, принадлежащие конкретному автору. Чем выше полнота, тем меньше авторских текстов остаются нераспознанными. Эта метрика важна для оценки того, насколько полно модель охватывает все примеры автора, что критично в приложениях, где пропускать тексты

¹Blog Authorship Corpus : [dataset]. – [San Francisco], 2026. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/ratatman/blog-authorship-corpus> (date of access: 20.01.2026).

²Project Gutenberg : [digital library]. – [United States], 2026. – URL: <https://www.gutenberg.org> (date of access: 20.01.2026).

³Reuters 50/50 : [dataset]. – [Irvine], 2026. – URL: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/217/reuter+50+50> (date of access: 20.01.2026).

нельзя (например, при судебной экспертизе или проверке соблюдения авторских прав). Recall помогает понять, насколько эффективно работает классификация именно по каждому из классов.

F1-мера представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Эта метрика особенно полезна, когда важно сбалансированное качество классификации – как уменьшение ложноположительных результатов, так и минимизация пропущенных текстов конкретного автора. F1-мера учитывает обе ошибки и дает более объективную оценку модели, особенно при неоднородном распределении текстов по авторам. Метрика широко применяется в задачах авторской идентификации для комплексной характеристики работы алгоритмов.

Аппаратное и программное обеспечение эксперимента

Модели обучались на аппаратных конфигурациях следующего вида: 24-ядерный CPU (Intel Core i9), ОЗУ 64 GB DDR5, графический ускоритель NVIDIA RTX 4070.

Экспериментальная часть исследования базируется на экосистеме Python версии 3.9.x, что обеспечивает стабильную работу всех используемых компонентов и оптимальную совместимость библиотек. Основу программной среды составил фреймворк PyTorch с поддержкой CUDA, обеспечивая эффективное использование графических ускорителей при обучении нейросетевых компонентов модели.

Для реализации классических алгоритмов машинного обучения применялась библиотека scikit-learn, которая содержит реализации методов опорных векторов, логистической регрессии и случайного леса с лучшими оптимизациями. Кроме того, данная библиотека обеспечивает эффективную параллелизацию вычислений на многоядерных процессорах через механизм `n_jobs`.

Квантовый вариационный модуль реализован на базе фреймворка PennyLane⁴, который предоставляет унифицированный интерфейс для работы с различными квантовыми симуляторами и реальными квантовыми устройствами. Для ускорения квантовых симуляций применяется оптимизированный симулятор PennyLane-Lightning, использующий векторные инструкции и параллелизацию вычислений. Этот симулятор успешно применяется на разных устройствах (как на CPU-, так и на GPU-процессорах). Поскольку эксперименты проводились на симуляции (в идеальной среде исполнения), то следует принять во внимание, что в реальных условиях на квантовых процессорах (QPU) могут быть получены иные результаты. Приведенные в работе эксперименты носят исследовательский теоретический характер с перспективой их подтверждения на реальных установках при возможности.

Результаты экспериментов

Первая серия испытаний была проведена на выборке, в которую отобрано по 10 авторов из каждого корпуса. Предполагалось, что это обеспечит равные условия для сравнения моделей на разных корпусах, снижая влияние дисбаланса по количеству классов. Таким образом был задан умеренный масштаб задачи при достаточно сложной многоавторской ситуации. Данный метод формирования выборки (отбора авторов

⁴PennyLane : [software platform]. – [Toronto], 2026. – URL: <https://pennylane.ai> (date of access: 20.01.2026).

и текстов) стандартизирует процесс экспериментов, упрощает интерпретацию результатов и позволяет проводить сравнения между корпусами с разной природой текстов. Результаты моделей с округлением представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента (выборка из 10 авторов)

Table 2

Results of the experiment (data sample from 10 authors)

Корпус <i>Corpus</i>	Модель <i>Model</i>	Точность <i>Accuracy</i>	F1	Полнота <i>Recall</i>	Время обучения <i>Training time</i>	Время работы <i>Opening hours</i>
Blog Authorship Corpus	SVM	73,2	74,1	71,7	12	0,03
	Логистическая регрессия	66,9	67,5	64,9	10	0,01
	Случайный лес	69,4	69,9	67,4	17	0,04
	Ансамбль классических моделей	76,7	77,9	75,3	21	0,08
	Гибридная модель	79,8	80,9	78,5	45	0,3
Project Gutenberg	SVM	74,6	75,2	72,3	14	0,05
	Логистическая регрессия	67,3	68,5	65,6	12	0,02
	Случайный лес	70,2	70,7	68,6	17	0,06
	Ансамбль классических моделей	78,7	79,7	77,2	23	0,15
	Гибридная модель	81,6	82,5	80,8	72	0,50
Reuters 50_50	SVM	71,1	71,9	69,2	19	0,05
	Логистическая регрессия	64,7	65,1	62,8	10	0,01
	Случайный лес	68,3	68,7	6,9	15	0,05
	Ансамбль классических моделей	73,5	74,2	71,6	25	0,1
	Гибридная модель	77,2	78,3	75,8	61	0,35

Время обучения указано в минутах, а время работы – в секундах на один текст. Показатели в таблице демонстрируют сравнительно одинаковую эффективность моделей, что обусловлено умеренным уровнем сложности за счет снижения влияния дисбаланса по числу классов. Ключевые выводы по первой серии испытаний можно сформулировать следующим образом:

– все модели показывают достаточно высокую точность, особенно ансамбли и гибридные модели, достигающие высоких показателей метрики F1, что указывает на хорошую способность классификаторов различать стили относительно небольшого числа авторов;

– относительно близкие результаты по разным корпусам свидетельствуют о том, что при умеренном числе классов стилистические и тематические отличия между авторами хорошо улавливаются выбранными алгоритмами, несмотря на разную природу текста;

– время работы моделей остается сравнительно небольшим, что указывает на практическую применимость алгоритмов для задач с небольшим числом авторов и достаточным объемом текстов на каждого.

Вторая серия испытаний проведена уже на комбинированной выборке с разным количеством авторов. В этом эксперименте использован набор из 100 авторов из корпуса Blog Authorship, из 30 авторов из Project Gutenberg и 50 авторов из Reuters 50/50. Выбор большого числа авторов из каждого корпуса отражает более сложную и масштабную задачу авторской идентификации с повышенной многоклассовой нагрузкой. Такая постановка эксперимента приближена к реальным условиям многоавторских систем и позволяет изучать поведение моделей в условиях, когда количество классов значительно варьируется. Методика выбора авторов и текстов обеспечивает сопоставимость результатов по разным корпусам, несмотря на различия в стиле, объеме и природе текстов. При этом структура задачи усложняется, что дает возможность оценивать устойчивость и масштабируемость моделей классификации.

В табл. 3 отражены результаты работы моделей в тяжелых многоклассовых условиях с большим количеством авторов, что моделирует более реалистичные сценарии авторской атрибуции в масштабах большого корпуса. Результаты приведены с некоторым округлением, время обучения – в минутах, время работы – в секундах на один текст.

Таблица 3

Результаты эксперимента (100, 30 и 50 авторов)

Table 3

Results of the experiment (100, 30 and 50 authors)

Корпус <i>Corpus</i>	Модель <i>Model</i>	Точность <i>Accuracy</i>	F1	Полнота <i>Recall</i>	Время обучения <i>Training time</i>	Время работы <i>Opening hours</i>
Blog Authorship Corpus	SVM	50,7	51,1	48,3	30	0,05
	Логистическая регрессия	44,4	44,9	41,9	25	0,015
	Случайный лес	46,3	46,7	44,3	32	0,05
	Ансамбль классических моделей	51,6	52,1	49,5	52	0,11
	Гибридная модель	55,3	55,8	53,1	140	0,35

Окончание табл. 3

End of table. 3

Корпус <i>Corpus</i>	Модель <i>Model</i>	Точность <i>Accuracy</i>	F1	Полнота <i>Recall</i>	Время обучения <i>Training time</i>	Время работы <i>Opening hours</i>
Project Gutenberg	SVM	58,7	59,2	56,5	34	0,03
	Логистическая регрессия	52,8	53,3	50,9	28	0,008
	Случайный лес	54,4	54,9	52,3	41	0,05
	Ансамбль классических моделей	60,2	60,6	58,2	63	0,09
	Гибридная модель	65,1	65,6	63,1	172	0,55
Reuters 50_50	SVM	62,1	62,7	59,9	30	0,05
	Логистическая регрессия	56,2	56,7	53,7	26	0,01
	Случайный лес	58,7	59,2	56,3	37	0,05
	Ансамбль классических моделей	64,2	64,8	62,1	52	0,09
	Гибридная модель	68,6	69,1	66,2	131	0,35

Ключевые выводы по данной серии испытаний можно сформулировать следующим образом:

– наблюдается заметное снижение точности и F1-меры по всем моделям, что связано с ростом числа классов и усложнением дискриминации между авторскими стилями, особенно в корпусе Blog Authorship;

– второй и третий корпуса с 30 и 50 авторами соответственно показывают более высокие метрики по сравнению с Blog Authorship при большем числе авторов, что может быть связано с особенностями корпусной структуры и большим объемом текста на каждого автора;

– ансамблевые и гибридные модели сохраняют преимущество по точности и полноте, демонстрируя лучшую устойчивость к росту числа классов, но при этом время работы существенно возрастает, особенно для гибридных решений, что влияет на производительность и требования к ресурсам.

Обсуждение результатов экспериментов

Сравнительный профиль исследуемых моделей по пяти ключевым рассмотренным характеристикам (полнота, точность, F1, превосходство над SVM, устойчивость к масштабу) изображен на рис. 1. Сплошная линия (внешний контур) отражает показатели гибридной архитектуры, контур пунктирной линией – ансамбль классических моделей, а внутренний контур построен на показателях базового метода опорных векторов.

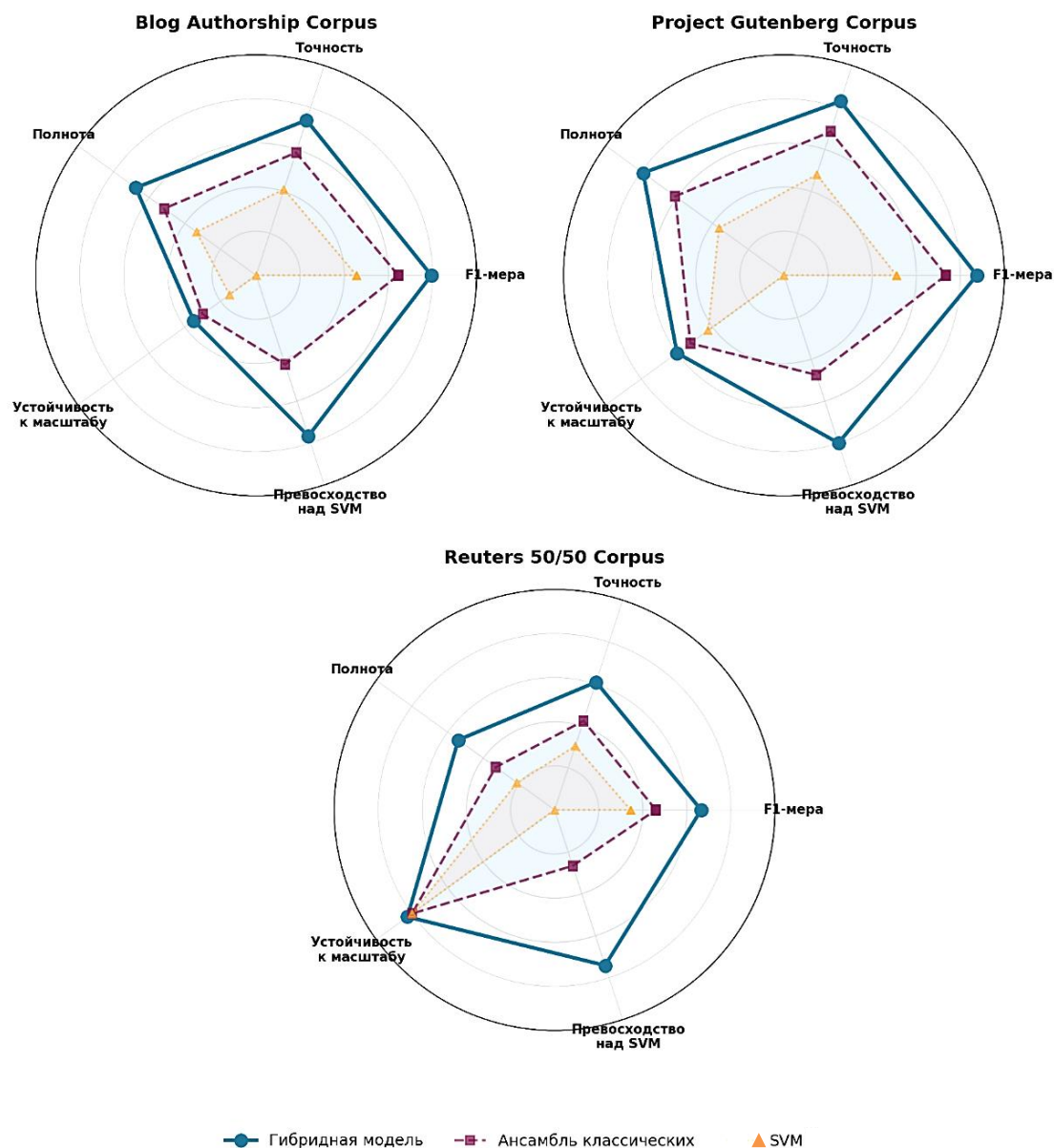


Рис. 1. Сравнительный профиль моделей
Fig. 1. Comparative profile of models

Наблюдаемое превосходство гибридной модели можно объяснить способностью квантового модуля выявлять сложные нелинейные зависимости в пространстве стилометрических признаков. Показательно, что относительный прирост качества максимален на наиболее сложном корпусе (Blog Authorship Corpus) и при большом числе классов, т. е. там, где классические методы испытывают затруднения с разделением близких авторских стилей. Это открывает перспективы применения гибридных квантово-классических архитектур в практических системах атрибуции, особенно при работе с короткими текстовыми фрагментами и обширными базами потенциальных авторов.

Помимо интегральных метрик качества важно понимать структуру ошибок классификатора: какие авторы распознаются надежно, а какие систематически смешиваются

между собой. Для этого были построены матрицы ошибок, где элемент на пересечении строки i и столбца j показывает долю текстов автора i , отнесенных моделью к автору j . Диагональные элементы соответствуют корректным предсказаниям, внедиагональные – ошибкам.

Матрица ошибок гибридной модели для Blog Authorship Corpus (10 авторов) изображена на рис. 2. Анализ матрицы показывает, что гибридная модель корректно классифицирует 76–85 % текстов каждого автора. Наибольшее смещение наблюдается между авторами С и D (семь и шесть ошибок соответственно), что объясняется схожей тематикой публикаций. Аналогичная картина и для авторов G и H, пишущих в схожем стиле.

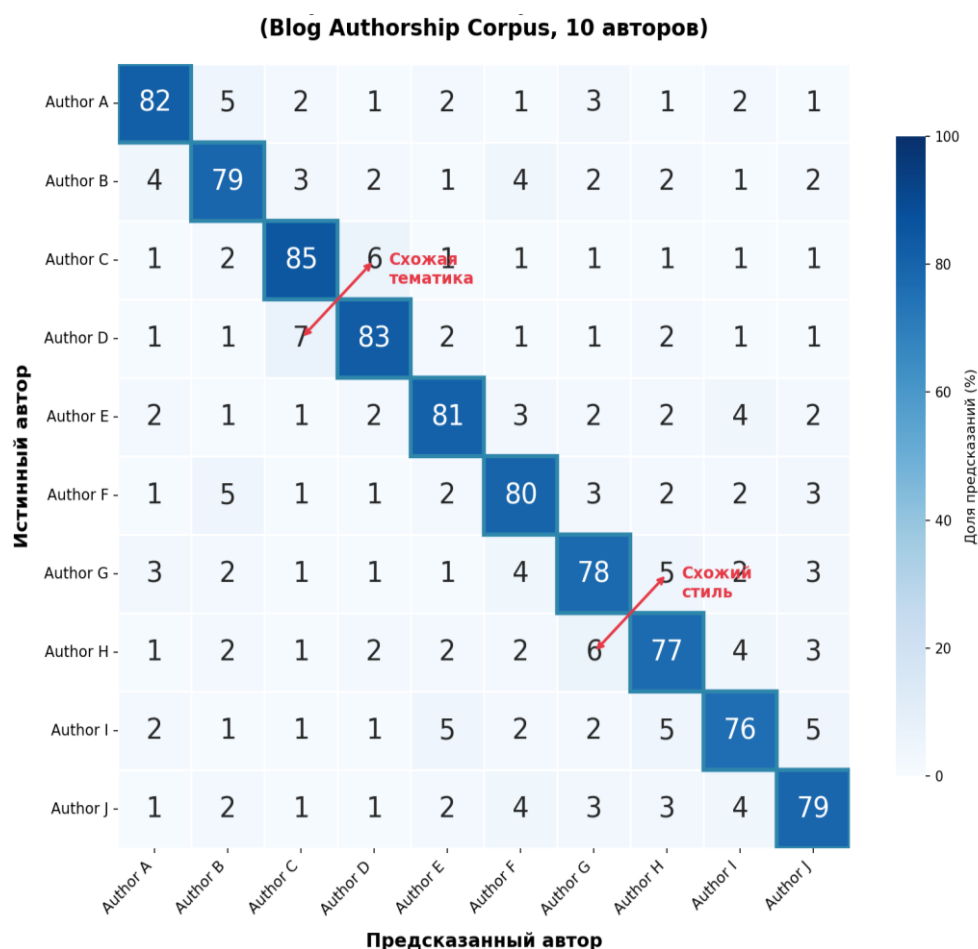


Рис. 2. Матрица ошибок гибридной модели

Fig. 2. Confusion matrix of the hybrid model

Таким образом, результаты экспериментов (табл. 2 и 3) показали, что на различных конфигурациях исследуемых корпусов и выборок гибридная модель демонстрирует устойчивые заметно лучшие показатели относительно других моделей как по точности, так и по метрике F1. Однако следует отметить, что достигнутые высокие результаты обременены большими временными затратами при обучении модели и ее работе. Это следует учитывать при построении прикладных информационных систем. В текущем ви-

де предлагаемая модель может применяться ситуативно в условиях, когда скорость работы системы не критична, а главной целью является обеспечение как можно большей точности. Кроме того, как это было в случае с некоторыми другими ML-моделями, текущая архитектура может стать гораздо эффективнее и раскрыть свой потенциал в будущем при ожидаемом появлении более совершенных технических средств эмуляции и эксплуатации [7].

Ограничения и направления дальнейшего развития

Несмотря на продемонстрированное превосходство гибридной квантово-классической модели, проведенное исследование имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов и планировании практического внедрения.

Число используемых кубитов значительно ограничено, что накладывает потолок на размерность квантового пространства признаков. Масштабирование до большего количества кубитов потенциально может улучшить результаты, однако такие вычислительные ресурсы пока остаются труднодоступными. Кроме того, интерпретируемость квантового модуля остается ограниченной, поскольку в отличие от классических признаков сложно объяснить, какие именно стилистические паттерны выявляются в квантовом пространстве. Можно констатировать, что на текущий момент квантовый модуль усугубляет проблему «черного ящика». Однако проблема «черного ящика» является общей в случаях применения подобного рода ML-реализаций. Поэтому такие решения в системах поддержки принятия решения чаще могут носить консультационный характер, чтобы избежать сложностей с юридическими аспектами обоснования полученных результатов. Также заслуживает внимания исследование альтернативных архитектур квантовых схем. Варьирование глубины схемы, типов используемых вентилей и стратегий запутывания кубитов открывает пространство для оптимизации под конкретные задачи атрибуции.

Вместе с тем одним из перспективных направлений развития является расширение набора признаков. Добавление эмбедингов, метрик читаемости и эмоциональной окраски текста может существенно повысить качество классификации.

Заключение

В рамках данной работы проведено экспериментальное исследование ансамблевых моделей и метода многоаспектного анализа текстов в задачах категоризации документов, в том числе с применением гибридного квантово-классического подхода.

Разработанная гибридная квантово-классическая модель, сочетающая классическое извлечение признаков с квантовым вариационным классификатором, была использована в серии экспериментов на различных корпусах с варьированием числа авторов. Полученные результаты позволяют утверждать, что гибридная модель превосходит классические методы и ансамбли на их основе по всем основным метрикам. Наибольшее преимущество предложенного подхода наблюдается при увеличении числа классов, что свидетельствует о лучшей способности гибридной модели работать в пространствах высокой размерности. В то же время анализ матрицы ошибок позволяет выявлять типичные паттерны смещения авторов и определять направления последующей оптимизации модели.

Дальнейшее развитие исследования связано с расширением признакового пространства, оптимизацией архитектуры квантовых схем и адаптацией модели для работы в разных условиях.

Вклад авторов. А. И. Парамонов предложил формулировки ключевых целей и задач исследования, определил план статьи и структуру эксперимента. Им выполнена верификация полученных результатов, а также корректировка и редактирование текста статьи; И. А. Труханович предложил конфигурацию гибридной модели и осуществил проведение компьютерных экспериментов. Им выполнен сбор экспериментальных данных, сформулированы основные результаты исследования и подготовлен черновик рукописи. Авторы вместе участвовали в интерпретации и анализе полученных данных компьютерных экспериментов.

Список использованных источников

1. Парамонов, А. И. Методы идентификации авторства в определении студенческого плагиата / А. И. Парамонов, И. А. Труханович // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 3. – С. 56–59. – <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-3-56-59>.
2. Variational quantum algorithms / M. Cerezo, A. Arrasmith, R. Babbush [et al.] // Nature Reviews Physics. – 2021. – Vol. 3, no. 9. – P. 625–644. – <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00348-9>.
3. Trukhanovich, I. Intelligent analysis in text authorship identification / I. Trukhanovich, A. Paramonov // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS) : сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Мн., 2024. – Вып. 8. – С. 327–332.
4. Парамонов, А. И. Ансамблевые методы многоаспектного анализа текстов в задачах категоризации документов / А. И. Парамонов, И. А. Труханович // Информационные системы и технологии = Information Systems and Technologies : материалы XI Междунар. науч. конгр. по информатике (CSIST-2025), Минск, 29–31 окт. 2025 г. : в 2 ч. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: С. В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2025. – Ч. 2. – С. 204–211.
5. Манахова, А. М. Анализ влияния стилометрических характеристик разного уровня на верификацию авторов художественных произведений / А. М. Манахова, К. В. Лагутина // Теория данных и моделирование информационных систем. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 260–279. – <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2021-3-260-279>.
6. Веретенников, И. С. Оценка качества классификации текстовых материалов с использованием алгоритма машинного обучения «Случайный лес» / И. С. Веретенников, Е. А. Карташев, А. Л. Царегородцев // Известия Алтайского государственного университета. – 2017. – № 4(96). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-klassifikatsii-tekstovykh-materialov-s-ispolzovaniem-algoritma-mashinnogo-obucheniya-sluchaynyy-les> (дата обращения: 20.01.2026).
7. Tatur, M. Open semantic technology as the foundation for new generation intelligent systems / M. Tatur, A. Paramonov // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS) : сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Мн., 2023. – Вып. 7. – С. 61–66.

References

1. Paramonov A. I., Trukhanovich I. A. *Authorship identification methods in student plagiarism detection*. Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika [System Analysis and Applied Information Science], 2023, no. 3, pp. 56–59 (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-3-56-59>.
2. Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R., Benjamin S. C., Endo S., ..., Coles P. J. Variational quantum algorithms. *Nature Reviews Physics*, 2021, vol. 3, no. 9, pp. 625–644. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00348-9>.

3. Trukhanovich I., Paramonov A. Intelligent analysis in text authorship identification. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem: sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS): Collection of Scientific Papers*]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2024, vol. 8, pp. 327–332.

4. Paramonov A. I., Trukhanovich I. A. *Ensemble methods of multi-aspect texts analysis in document categorization tasks*. Informacionnye sistemy i tehnologii: materialy XI Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa po informatike (CSIST-2025), Minsk, 29–31 oktjabrja 2025 goda : v 2 chastjah [*Information Systems and Technologies: Proceedings of the 2025 International Scientific Congress on Informatics (CSIST-2025), Minsk, 29–31 October 2025: in 2 parts*]. Ed. board: S. V. Ablamejko, V. V. Kazachenok, A. N. Kurbackij, V. V. Krasnoproshin. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet, 2025, pt. 2, pp. 204–211 (In Russ.).

5. Manakhova A. M., Lagutina N. S. *Analysis of the impact of the stylometric characteristics of different levels for the verification of authors of the prose*. Teorija dannyh i modelirovanie informacionnyh sistem [*Modeling and Analysis of Information Systems*], 2021, no. 28, no. 3, pp. 260–279 (In Russ.). <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2021-3-260-279>.

6. Veretennikov I. S., Kartashev E. A., Tsaregorodtsev A. L. *Assessment of the quality of text classification using the machine learning algorithm "Random forest"*. Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta [*Izvestiya of Altai State University*], 2017, no. 4(96) (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-klassifikatsii-tekstovyh-materialov-s-ispolzovaniem-algoritma-mashinnogo-obucheniya-sluchaynyy-les> (accessed 20.01.2026).

7. Tatur M., Paramonov A. Open semantic technology as the foundation for new generation intelligent systems: sbornik nauchnyh trudov [*Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS): Collection of Scientific Papers*]. Ed. board: V. V. Golenkov, I. S. Azarov, V. A. Golovko, A. N. Gordey, N. A. Guliakina, ..., D. V. Shunkevich. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2023, vol. 7, pp. 61–66.

Информация об авторах

Труханович Илья Александрович, соискатель, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

E-mail: ilya.trukhanovich@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9935-1825>

Парамонов Антон Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Института информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

E-mail: a.paramonov@bsuir.by

<https://orcid.org/0000-0001-6616-2481>

SPIN-код: 4280-3133

Information about the authors

Ilya A. Trukhanovich, Applicant, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

E-mail: ilya.trukhanovich@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9935-1825>

Anton I. Paramonov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Information Systems and Technologies of the Institute of Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

E-mail: a.paramonov@bsuir.by

<https://orcid.org/0000-0001-6616-2481>

SPIN code: 4280-3133

УДК 004.93
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-21-38>

Поступила в редакцию | Received 09.04.2026
Подписана в печать | Accepted 05.05.2026
Опубликована | Published 30.06.2026

Предсказание центров ядер раковых клеток на иммуногистохимических флуоресцентных изображениях

В. В. Скакун[✉], Сылунь Сюй

[✉]E-mail: skakun@bsu.by

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

Аннотация

Цели. Цель исследования состоит в разработке метода предсказания центров ядер раковых клеток на иммуногистохимических флуоресцентных изображениях с использованием точечной разметки центров ядер.

Методы. В работе используются сверточные нейронные сети глубокого обучения.

Результаты. Предложен метод предсказания центров ядер раковых клеток на иммуногистохимических флуоресцентных изображениях пораженных тканей, отличающийся от существующих использованием точечной разметки центров ядер при обучении сети. Разработан алгоритм предварительной и заключительной обработки изображений, позволяющий проводить полный цикл анализа изображений любой размерности.

Заключение. Метод предсказания центров ядер раковых клеток на иммуногистохимических флуоресцентных изображениях имеет простую архитектуру, небольшое количество обучаемых параметров и не требует сложной постобработки результатов анализа, традиционной при семантической сегментации ядер клеток, заключающейся в разделении слипшихся ядер. Метод позволяет подсчитывать количество раковых клеток на единицу площади, что в свою очередь предоставляет возможность оценить степень заболевания. Полное время анализа изображения размером 2048×2048 пикселей с использованием вычислителя T4 (Google Colab) составляет в среднем 750 мс, что открывает возможности анализа полнослайдовых изображений высокой размерности за приемлемое время.

Ключевые слова: иммуногистохимические изображения, изображения раковых клеток, предсказание центров ядер, подсчет клеток, нейронные сети глубокого обучения, архитектура U-Net

Для цитирования. Скакун, В. В. Предсказание центров ядер раковых клеток на иммуногистохимических флуоресцентных изображениях / В. В. Скакун, Сылунь Сюй // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 21–38. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-21-38>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Prediction of cancer cell nuclear centers in immunohistochemical fluorescence images

Victor V. Skakun✉, Silun Xu

✉E-mail: skakun@bsu.by

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

Abstract

Objectives. The aim of the study is to develop a method for predicting cancer cell nuclear centers in immunohistochemical fluorescence images using point annotation of nuclear centers.

Methods. Deep learning convolutional neural networks are used in this study.

Results. A method for predicting cancer cell nuclear centers in immunohistochemical fluorescence images of diseased tissues is proposed. The method differs from existing approaches by using point annotation of nuclear centers during the learning process. An algorithm for image pre- and post-processing has been developed, enabling an end-to-end analysis for images of any dimension.

Conclusion. A method for predicting cancer cell nuclear centers in immunohistochemical fluorescence images has been developed. It has a simple architecture, a small number of trainable parameters, and does not require complex post-processing of analysis results, traditionally involved in semantic segmentation for separating clustered nuclei. The method allows for counting the number of cancer cells per unit area, which in turn makes it possible to assess the extent of the disease. The total analysis time for a 2048×2048 pixel image using the T4 (Google Colab) compute engine averages 750 ms, enabling the analysis of high-dimensional, whole-slide images in a reasonable time.

Keywords: immunohistochemical imaging, cancer cell imaging, nuclear center prediction, cell counting, deep learning neural networks, U-Net architecture

For citation. Skakun V. V., Xu Silun. *Prediction of cancer cell nuclear centers in immunohistochemical fluorescence images*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 2, pp. 21–38 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-21-38>.

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

Введение

Рост заболеваемости раком и необходимость повышения эффективности диагностики требуют внедрения технологий, способных обеспечить более точную, быструю и воспроизводимую интерпретацию морфологических данных. Традиционные методы визуального анализа гистологических препаратов, основанные на экспертной оценке патологов, остаются золотым стандартом, однако они подвержены субъективности, вариабельности между специалистами и значительным временным затратам. В условиях увеличивающегося объема данных и потребности в стандартизации возникает объективная необходимость в автоматизации ключевых этапов анализа микроскопических изображений.

Одной из фундаментальных задач цифровой патологии является точное определение количества, морфологии и локализации ядер раковых клеток [1, 2]. Ядра несут критически важную информацию о состоянии ткани, их форма, размер, плотность распределения и структурные особенности позволяют судить о степени злокачественности. В частности, сегментация ядер раковых клеток служит основой для последующих этапов

анализа – классификации клеток, оценки микроокружения опухоли и построения количественных морфометрических моделей. Если сегментация ядер позволяет определять морфологические особенности клеток и классифицировать их на здоровые и раковые, то простой подсчет их числа на единицу площади дает количественную оценку степени поражения и дает возможность следить за динамикой болезни или же за ее лечением [2–6].

С развитием методов машинного обучения, особенно искусственных нейронных сетей, автоматизация анализа гистологических изображений получила новый импульс. Сверточные нейронные сети глубокого обучения (convolutional neural network, CNN) [3, 5, 7] продемонстрировали способность эффективно извлекать сложные пространственные зависимости и морфологические признаки, недоступные традиционным алгоритмам компьютерного зрения. Эти методы позволяют достигать высокой точности в задачах детекции и сегментации клеточных структур, что делает их перспективным инструментом для клинической практики и научных исследований. Предложено большое количество архитектур нейронных сетей: U-Net [8], U-Net 3+ [9], Trans-U-Net [10], U-ResNet [11], достаточно эффективно решающих задачу сегментации объектов на изображениях.

Тем не менее задача сегментации ядер раковых клеток остается нетривиальной и сложной. Иммуногистохимические изображения, равно как и гистологические изображения других видов, характеризуются высокой вариабельностью. Различия в методах окрашивания, качестве подготовки препаратов, типах тканей и морфологических особенностях опухолей создают значительные сложности для алгоритмов автоматического анализа. Ядра могут иметь неправильную форму, быть частично перекрытыми, деформированными или плохо различимыми на фоне цитоплазмы и стромы. Кроме того, высокая плотность клеток в опухолевых тканях приводит к тому, что ядра располагаются очень близко друг к другу, это усложняет их корректную локализацию. Все вышеперечисленные модели сегментации имеют один общий недостаток – необходимость в постобработке слипшихся и перекрытых ядер, что представляет собой едва ли не более сложную задачу, чем исходная задача сегментации их контуров.

Отметим успех гибридных нейронных сетей, позволяющих не только сегментировать контуры некоторых объектов, но и выделять эти объекты как самостоятельные единицы (чаще всего с помощью прямоугольных ограничивающих рамок). Появилось новое направление сегментации объектов (instance segmentation) [12, 13], не требующее сложной постобработки, характерной при семантической сегментации. Каждое ядро выделяется как отдельный объект, даже если имеется перекрытие с соседним ядром [14]. Недостатком данного подхода является то, что гибридные нейронные сети имеют очень сложную архитектуру и, соответственно, сложны в реализации [12, 13].

Как уже было отмечено выше, кроме необходимости точной сегментации контуров ядер в целях определения морфологических особенностей клеток нужно еще уметь их считать [4, 15, 16]. Задача подсчета количества ядер может быть сведена к задаче определения центров ядер и прямому подсчету последних. Интуитивно понятно, что предсказание центров ядер должно представлять собой значительно более простую задачу. Не требуется даже совершенно точно определять центр ядра. Если средний диаметр ядер составляет десятки пикселей, то ошибка даже в 20–30 пикселей не будет критической. Не нужно будет производить и постобработку, так как центры ядер обычно разделены

значительным расстоянием в десятки пикселей, да и разметка изображений существенно упрощается.

Подсчет количества (определение плотности) клеток является отдельным направлением научных исследований при анализе гистологических изображений [6, 17, 18]. Каждая клетка чаще всего помечается одной точкой в своем центре, вместо того чтобы требовать ограничивающего прямоугольника или маски сегментации. Эти точечные аннотации затем преобразуются в карты плотности, где каждое аннотированное местоположение клетки представляется либо диском некоторого радиуса [19], либо гауссовским пятном [6, 15, 20], либо картой расстояний, принимающей значения в интервале [0–1] от вручную размеченных центров клеток [17, 18]. Во время обучения модель учится предсказывать эту карту плотности. Во время анализа изображений местоположение каждой клетки определяется путем пороговой обработки [4] или поиска локальных максимумов на предсказанных картах плотности [6].

Хотя данное направление представлено большим количеством публикаций [4–6, 15–23], авторам не удалось найти работы, которые бы использовали точечную разметку центров ядер раковых клеток для обучения нейронной сети. Всегда на вход нейронной сети подавались размеченные изображения, где центр ядра представлен не одним пикселем, а диском, гауссовским ядром или некоторым другим объектом значительного (в некоторых работах близкого к среднему радиусу клеток [21]) размера. Это в целом оправдано, поскольку в противном случае модель приходилось бы обучать на очень разреженных данных, но явно не доказано. Наиболее близкой к исследуемой авторами проблеме является point-to-point-генерация центров ядер клеток при объектной сегментации ядер в работе [24] (реализация блока prompter).

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию метода предсказания центров ядер раковых клеток на основе их точечной аннотации. Метод основан на классической архитектуре U-Net [8]. Измерения архитектуры коснулись лишь введения пакетной нормализации и значительного (в восемь раз) уменьшения количества каналов свертки. Цель данной работы состоит не в получении state-of-art-результатов и выборе архитектуры нейронной сети, наилучшим образом решающей данную задачу, а в демонстрации работоспособности и эффективности предлагаемого метода. Используя простую архитектуру, малое количество обучаемых параметров (менее 500 000) и точечную разметку, являющуюся наиболее простой для экспертов, предлагаемый метод демонстрирует хорошие результаты: превышающую 0,9 меру F1 и близкую к 0,95 меру полноты, рассчитанную для предсказанных вероятностей соотношения пикселей к центру ядра на тестовом изображении при пороге 0,05 и радиусе допуска в 15 пикселей, что в два с лишним раза меньше среднего радиуса ядра.

Материалы и методы

В работе используются иммуногистохимические флуоресцентные изображения раковых клеток молочной железы, полученные с 10-кратным увеличением на инвертированном эпифлуоресцентном микроскопе Nikon TE200, оснащенный CCD-камерой серии Photometrics 300. Изображения представлены в стандарте RGB размером 2048×2048 с разрешением 0,2 мкм/пиксель или 5 мкм. В качестве индикатора раковых клеток используется белок эстроген-рецептор, помеченный красителем Cy5 [1, 2]. В цитоплазме

раковых клеток наблюдается белок цитокератин, маркируемый красителем Cy3. Все ядра как раковых клеток, так и здоровых маркированы красителем DAPI. Более подробную информацию по исследуемым изображениям можно найти в работе [7]. Протокол подготовки образцов и методика получения изображений подробно описаны в статье [1]. Размеченные изображения, где выделены только маски ядер раковых клеток (ground truth), представляют собой бинарные изображения, в которых пикселям ядер клеток присвоено значение 1.

Программная реализация нейронной сети проводилась на языке Python с помощью библиотек NumPy, SciPy, CV2, TensorFlow, tensorflow_probability и Keras. Для организации исследований использовались среда Google Colab и бесплатный тарифный план. Обучение проводилось на стандартном графическом вычислителе T4, аугментация изображений не осуществлялась.

Результаты и обсуждение

Подготовка обучающего набора. В распоряжении авторов имеется всего девять размеченных изображений размером 2048×2048 пикселей. Для повышения объема выборки использовался подход, заключающийся в разбиении исходного изображения на подобласти (далее будем называть их патчи) размером 256×256 с перекрытием на 128 пикселей (половину размера патча) как по горизонтали, так и по вертикали [7, 25]. Данный подход обеспечивает сохранение точности оригинальных деталей изображения, одновременно значительно увеличивая объем обучающейся выборки и решая проблему ограниченности объема памяти вычислительного устройства. Одно изображение было отобрано (случайно) для теста и не участвовало в обучении нейронной сети. Оставшиеся восемь изображений дали 1800 патчей, некоторые из них представлены на рис. 1. Яркость и контрастность изображения были повышены независимо для каждого канала с помощью функции `equalizeHist` пакета CV2 (Python).

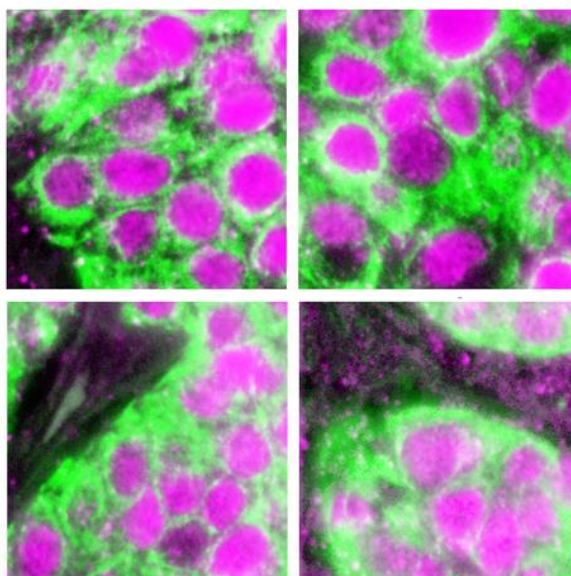


Рис. 1. Пример фрагментов (патчей) исходного изображения

Fig. 1. Example of fragments (patches) of the original image

Соответственно, объем тестовой выборки составил 225 патчей. Так как в заключение необходимо было восстановить изображение исходного размера, одновременно с разбиением на патчи создавался массив левых верхних абсолютных координат каждого патча. Такой подход позволил легко собирать результирующее изображение из патчей, даже если некоторые патчи не участвовали в процессе обучения или анализа (например там, где не было ни одной клетки).

Для предсказания центров ядер в данной работе использовался самый простой, но, как оказалось, достаточно эффективный вариант, заключающийся в замене каждой маски ядра на размеченном бинарном изображении на их геометрические центры (центроиды) размером в один пиксель. Задача, соответственно, свелась к предсказанию этих центров на основе исходных изображений. Вычисление центроидов было выполнено для исходного изображения, поскольку после разбиения на патчи сравнительно небольшого размера центроиды, вычисленные для одного и того же ядра, попавшего в центр патча или лежащего на его границе вследствие частичного перекрытия патчей, сильно отличались. Разумеется, это не способствовало повышению точности предсказания. Тем не менее возник вопрос, что делать с ядрами, лежащими на границе исходного изображения. Полностью игнорировать их неправильно, так как нейронная сеть после обучения стала уверенно предсказывать их центры, что несправедливо занижало метрики качества, давая большое количество ложноположительных результатов. Вычисление центроидов для всех ядер безотносительно того, какая часть ядра находится внутри изображения, тоже приводит к сильному смещению вычисленного центроида от истинного центра ядра. В данной работе предложен следующий критерий. Если отношение количества пикселей маски ядра, контактирующей с границей изображения, к общему периметру маски больше некоторого порога (выбран эмпирически 0,05), то вычисление центроида не производится. Результат вычисления центроидов (для одного патча) показан на рис. 2. Средняя площадь ядер составила 4586 пикселей, что соответствует кругу с радиусом в 38,2 пикселей. Маски ядер представлены только в целях визуализации (в процессе обучения и анализа не участвуют).

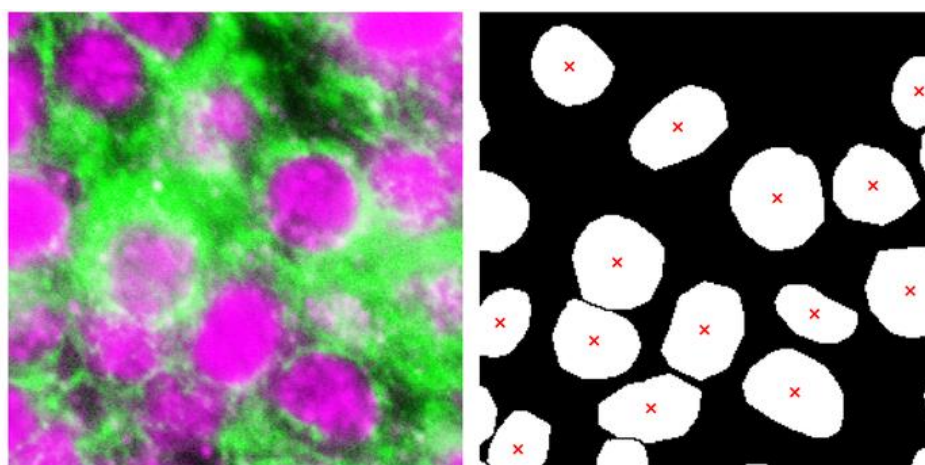


Рис. 2. Исходное изображение и маски ядер с вычисленными центроидами

Fig. 2. Original image and nuclear masks with calculated centroids

Архитектура нейронной сети. Несмотря на то что в настоящее время существует множество моделей CNN, показывающих хорошие результаты семантической сегментации, например UNet 3+ [9], TransUNet [10], включая сложные гибридные сети [12, 13], авторы выбрали классическую архитектуру U-Net [7], показывающую отличные результаты сегментации при сравнительной простоте реализации сети [20]. Поскольку задача предсказания только центров ядер раковых клеток много проще, было уменьшено количество каналов свертки вдвое в каждом блоке по сравнению с реализацией в работе [7] (в восемь раз по отношению к оригинальной работе [8]) и тем самым значительно уменьшено количество обучаемых параметров с $1,94 \times 10^6$ до 492 609. Для сравнения, большинство из рассмотренных выше нейронных сетей для подсчета количества клеток имеют намного более сложные архитектуры и число обучаемых параметров в несколько миллионов.

С целью улучшения сходимости и стабилизации обучения после каждой свертки используются слои пакетной нормализации (batch normalization), а для регуляризации – слои Dropout. На входе сети исходные данные приводятся к диапазону 0–1 путем деления на 255.

Энкодер состоит из четырех блоков, выполняющих последовательно 2D-конволюцию с последующей активацией ReLU, пакетную нормализацию, регуляризацию, повторную конволюцию того же размера с последующей активацией ReLU, пакетную нормализацию и максимальный пулинг. Число каналов свертки последовательно увеличивается с 8 до 64. Величина регуляризации 0,1, 0,1, 0,2, 0,2. Затем следует блок bottleneck той же архитектуры за исключением пулинга с числом каналов свертки 128 и потерями 0,3. Декодер также состоит из четырех блоков, выполняющих соответственно повышение размерности (UpSampling2D), конкатенацию с аналогичным блоком энкодера для передачи высокоуровневой информации с энкодера на декодер, конволюцию 2D, пакетную нормализацию, активацию ReLU, регуляризацию и повторную конволюцию того же размера с последующей пакетной нормализацией и активацией ReLU. Число каналов свертки и величина регуляризации меняются в обратном порядке по сравнению с энкодером. Замыкает сеть слой конволюции 2D с размерностью 1, ядром 1×1 и активацией Sigmoid, формирующий карту сегментации размером $256 \times 256 \times 1$.

Для обучения выбран оптимизатор adam, функция потерь – стандартная бинарная кросс-энтропия. Выбор метрики качества для мониторинга процесса обучения был довольно сложен. В принципе, при предсказании центров ядер с точечной разметкой можно применять метрики IoU (пересечение над объединением) или Dice, которые обычно используются при семантической сегментации [7]. В данном случае эти метрики не позволяют достоверно оценить качество предсказания центров ядер, поскольку истина (ground truth) представляет собой бинарное изображение со значением 1 только в центре каждого ядра раковой клетки, а результат предсказания – кластер вероятностей небольшого размера гауссовского вида, иногда немного вытянутого по одной оси, который может быть очень близок к истинному центру, но нигде не пересекается с ним. Даже при очень близком расположении предсказанного кластера вероятностей к истинному центру, представленному всего одним пикселем, значение метрик IoU/Dice будет иметь или очень малое значение или будет равно нулю. Фактически точное предсказание демонстрирует крайне низкие значения метрики.

Введение абсолютного порога для соотношения пикселей либо к фону, либо к центру ядра не является оптимальным. Значения карты предсказаний динамически меняются

в процессе обучения в широких пределах. Абсолютное значение метрики в очень сильной степени зависит от абсолютных значений предсказанных вероятностей и выбранного порога, что не позволяет достоверно оценить качество и точность предсказания центров ядер.

Использование метрики, основанной на измерении евклидова расстояния между истинным центром и центром кластера, предсказанного моделью [4, 17], приводит к увеличению времени обучения и многочисленным ошибкам в самом начале обучения, так как измерение расстояния может производиться с центром ядра соседней, а не текущей клетки. Поиск локальных максимумов с последующим использованием методов быстрого радиусного поиска по пространству, например cKDTree (Python), значительно повышает скорость обучения, но также не является эффективным на начальном этапе обучения.

В качестве метрики качества для мониторинга процесса обучения в данной работе предлагается вычислять полноту (Recall) с адаптивным порогом для соотнесения пикселей к предсказанному центру ядра, вычисленному на основе p -го персентили прогнозируемых значений в каждом патче:

$$Recall = \frac{TP}{PP + \varepsilon}, \quad (1)$$

где $TP = \sum_i \sum_{x \in \Omega} y_{true}^{(i)}(x) y_{bin}^{(i)}(x)$ – количество истинно положительных результатов;

$PP = \sum_i \sum_{x \in \Omega} y_{true}^{(i)}(x)$ – количество возможно положительных результатов (в матрице оши-

бок это сумма $TP + FN$, т. е. все объекты, которые на самом деле являются положитель-

ными); $y_{bin}^{(i)}(x) = \begin{cases} y_{pred}^{(i)}(x) \geq T_p, & T_p = \text{Percentile}_p(y_{pred}^{(i)}(x) | x \in \Omega), \\ 0, & \text{если иначе,} \end{cases}$ $y_{pred}^{(i)}(x)$ – предсказан-

ная карта вероятностей для изображения i , $y_{true}^{(i)}(x)$ – бинарная карта истинных центров, $x \in \Omega$ – пиксель изображения, ε – некоторое малое значение (например, 1×10^{-6}). При подсчете истинно положительных результатов происходит поэлементное умножение меток. Так как и $y_{pred}^{(i)}(x)$, и $y_{true}^{(i)}(x)$ состоят из 0 и 1, результат будет равен 1 только в том случае, если оба значения равны 1. Учитывая, что $y_{true}^{(i)}(x)$ принимает значение 1 только один раз для каждого ядра, в данной метрике подсчитывается не количество пикселей, принявших значение, которое превышает порог, а количество успешно предсказанных центров ядер.

Количество эпох обучения было выбрано равным 100 при размере пакета 16. Обучающая выборка перемешивалась случайным образом и разбивалась в процентном соотношении 80 к 20, где 20 % размеченных изображений используются для валидации процесса обучения. Сам процесс обучения был разбит на два этапа, так как метрика качества вида (1) вначале может иметь большое значение, после нескольких эпох достигать своего минимального значения и только затем начинать повышаться. Использование функций обратных вызовов, таких как ранний останов, снижения скорости обучения при выходе метрики на плато и создания контрольных точек с сохранением лучших весов (при указании данной метрики для мониторинга), в этом случае не дает желаемого эффекта. Соответственно, первые 20 эпох модель обучалась без использования функций обратных

вызовов, а последующие 80 эпох – с использованием. Для мониторинга процесса обучения в функциях обратных вызовов применялась метрика качества (1). Скорость обучения стандартная: 1×10^{-3} со снижением до минимума 1×10^{-6} .

Результаты предсказания центров ядер. Разработанный метод был реализован на языке Python с помощью библиотек Tensorflow и Keras. Обучение и тестирование проводились с использованием ресурса Google Colab на стандартном графическом вычислителе T4. Получены хорошие результаты как на валидационной, так и на тестовой выборках. Длительность обучения составила в среднем 900 с. Визуальная оценка качества предсказания в большинстве случаев очень хорошая (рис. 3). Кластеры точек, предсказывающие центры ядер (отображены красным цветом), получены при пороге 0,05 (результат предсказания предварительно приведен к диапазону 0–1).

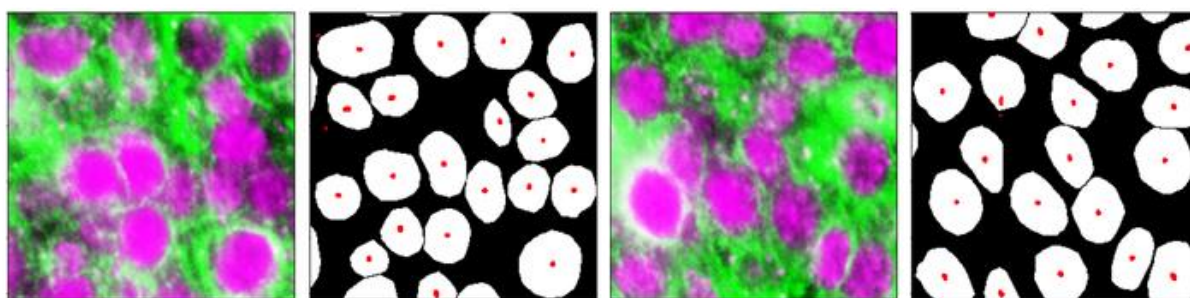


Рис. 3. Результат предсказания центров ядер на тестовой выборке

Fig. 3. The result of predicting the nuclei centers on the test sample

Для исследования влияния выбора порога вычисления метрики (1) были проведены три вычислительных эксперимента с разным порогом p , равным 50,0, 75,0, 95,0. Графики метрики качества при обучении сети показаны на рис. 4 (результаты для последних 12–19 эпох до ранней остановки не представлены). Среднее значение функции потерь на тестовой, обучающей и валидационной выборках в трех экспериментах составило соответственно 0,0013, $8,84 \times 10^{-4}$ и $8,87 \times 10^{-4}$. Значения метрики качества (1) на тестовой, обучающей и валидационной выборках приведены в табл. 1. Первым идет значение для тестовой выборки, в скобках – для обучающей и валидационной.

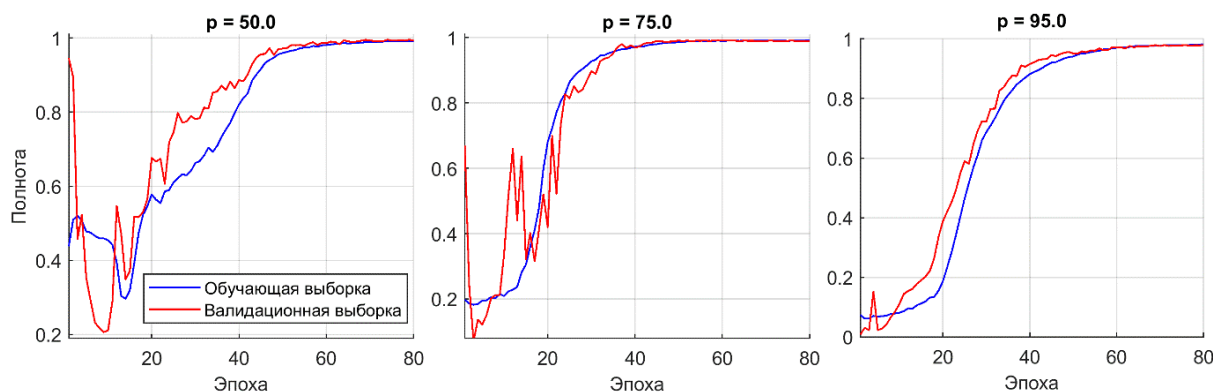


Рис. 4. Графики метрики качества при обучении сети

Fig. 4. Graphs of the quality metric during network training

Таблица 1

Метрики оценки качества предсказания центров ядер
раковых клеток

Table 1

Metrics for assessing the quality of prediction of cancer
cell nuclear centers

Величина порога p Threshold value p	Значение метрики качества Quality metrics value
50,0	0,9899 (0,9930, 0,9945)
75,0	0,9873 (0,9912, 0,9892)
95,0	0,9552 (0,9805, 0,9803)

Результат обучения незначительно зависел от выбранного порога вследствие наличия обратных вызовов функций, регулирующих скорость обучения и выбора наилучших весов по значению метрики качества (функция потерь одна и та же). Результат предсказания для одного из патчей (для эксперимента с порогом $p = 75,0$) показан на рис. 5, а. Значения пикселей были предварительно масштабированы к диапазону 0–1 путем деления на максимальное значение и последующего умножения на 255. Что характерно, кластеры точек, формирующих предсказанные центры, не являются размытыми. Это свидетельствует о способности модели довольно точно и уверенно предсказывать центры ядер (вероятность отнесения пикселя к фону близка к 0 даже при незначительном расстоянии от центра предсказания). На рис. 5, б изображены предсказанные центры (при пороге 0,05), истинные центры и маски, на основе которых они были вычислены. Соответственно, последующий расчет метрик при данном пороге оправдан, а не является стремлением повысить их значение. Для демонстрации результатов выбран патч, где часть области (сверху) образована клетками здоровой ткани, что представляет дополнительную сложность для модели.

По наблюдениям авторов, наиболее оптимальное значение порога p лежит в диапазоне от 75,0 до 95,0. При более высоких значениях порога значение метрики близко к нулю на очень большом количестве эпох обучения, что не позволяет эффективно мониторить процесс обучения. Получение более высоких значений метрики качества при меньшем пороге p легко объяснимо. Диаметр кластеров точек, участвующих в вычислении метрики, увеличивается, повышая вероятность «захвата» истинного центра.

Заключительный этап предсказания центров ядер – реконструкция исходного изображения размерностью 2048×2048. Выполнение данного этапа также не является тривиальным. Разбиение исходного изображения на патчи с перекрытием приводит к тому, что результат предсказания центра ядра может несколько отличаться для каждого из патчей, а если ядро попадает на границу патча, то и значительно. Соответственно, предлагается следующий алгоритм:

- 1) вычисляется среднее арифметическое значений пикселей на основе всех перекрытий;
- 2) объединяются центры предсказания с помощью метода кластеризации, который объединяет точки в кластеры, если они больше некоторого порога и расстояние между

ними меньше некоторого указанного (в работе использовался порог 0,05 и расстояние в 15 пикселей);

3) для каждого кластера вычисляется среднее арифметическое его координат (определяется центроид кластера).

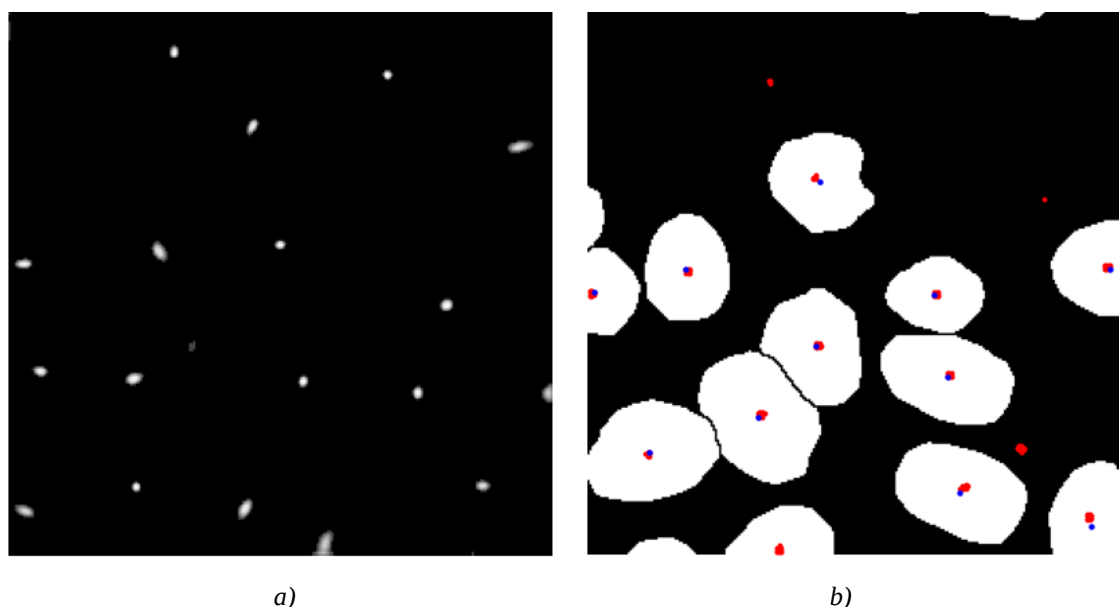


Рис. 5. Результат предсказания центров ядер:

a) результат предсказания при пороге 0,05 (данные масштабированы к диапазону $[0, 1]$);

b) сравнение предсказанных центров (красный) с истинными центрами (синий)

Fig. 5. The result of the prediction of the nuclear centers:

a) the prediction result at the threshold of 0.05 (data are scaled to the range $[0, 1]$);

b) comparison of the predicted centers (red) with the true centers (blue)

Таким образом, каждый предсказанный центр представляется одним пикселем со значением, равным 1. В работе использовался метод DBSCAN библиотеки sklearn (Python), характеризующийся высокой скоростью работы. Фрагмент результирующего изображения (при эксперименте с $p = 75,0$, радиусе окрестности 15 пикселей и минимальном количестве соседей 1) показан на рис. 6. Красным цветом отображены предсказанные центры, синим – истинные. Маски ядер нанесены в целях улучшения визуализации качества предсказания. Радиус окрестности поиска выбран равным половине среднего радиуса ядер, поскольку значительное количество ядер имеет меньший размер. Подавляющее большинство центров ядер предсказано с высокой точностью. Имеется некоторое количество предсказаний центров ядер вне масок, что можно классифицировать как наличие значительного числа ложноположительных результатов. При внимательном рассмотрении исходного изображения (данные не представлены) практически на всех предсказанных местах в действительности можно найти слабо заметные ядра раковых клеток, пропущенные экспертом при разметке. В данном случае модель продемонстрировала результаты, превышающие способности экспертов.

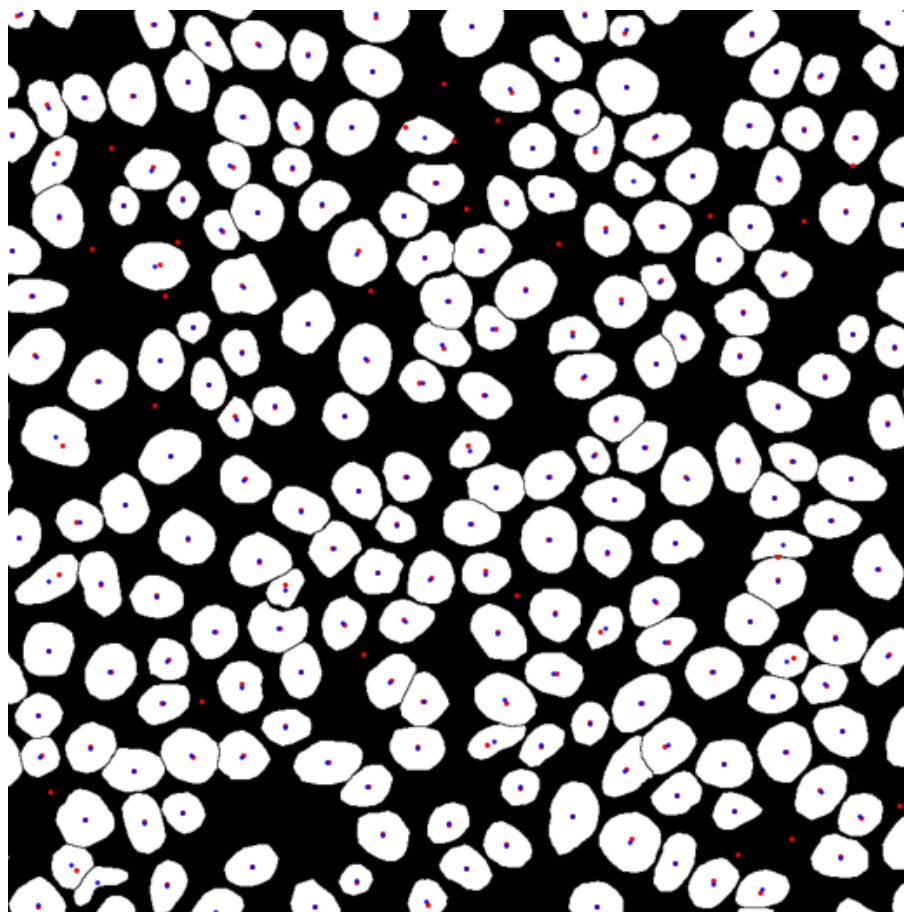


Рис. 6. Финальный результат предсказания центров ядер для фрагмента изображения из тестовой выборки

Fig. 6. The final result of predicting the nuclear centers for a part of the image from the test set

Используемая в работе метрика (1) не является оптимальной и может давать завышенные показатели. Для оценки качества предсказания центров ядер на уже обработанных данных были рассчитаны метрики точности (Precision), полноты (Recall) и гармоническое среднее точности и полноты (F1), основанные на вычислении евклидова расстояния от предсказанного центра ядра до ближайшего истинного [20]. С некоторыми незначительными вариациями, связанными с вычислением центроидов кластеров предсказаний, метрики данного класса часто используются для задач подсчета клеток на изображении [4, 17, 20]. Приведем алгоритм вычисления метрик:

- 1) вычисляются множества предсказанных и истинных центров;
- 2) для оптимизации вычислений строится структура данных k -мерного дерева (например, с помощью пакета `cKDTree` библиотеки `scipy`) над множеством предсказанных центров (что позволяет эффективно выполнять запросы поиска соседей в многомерном пространстве);
- 3) истинный центр ядра считается успешно предсказанным (true positive), если на расстоянии не более заданного радиуса допуска r существует хотя бы один предсказанный центр;

4) вычисляется количество истинно положительных, ложноположительных и ложноотрицательных предсказаний соответственно как количество успешно предсказанных, разность общего числа предсказанных и успешно предсказанных и разность общего числа истинных и успешно предсказанных.

Значения метрик точности, полноты и гармонического среднего точности и полноты, рассчитанные по стандартным формулам [4, 17] с использованием приведенного выше алгоритма, при разной величине радиуса r от пяти пикселей до среднего радиуса ядра в 35 пикселей, даны в табл. 2.

Таблица 2

Метрики оценки качества предсказания центров ядер раковых клеток на финальном изображении при разной величине радиуса r

Table 2

Metrics for assessing the quality of prediction of cancer cell nuclear centers in the final image for different values of radius r

Метрика качества Quality metrics	$r = 5$	$r = 15$	$r = 35$
Точность	0,814	0,861	0,901
Полнота	0,896	0,948	0,992
F1	0,853	0,902	0,944

Заключение

Разработан метод предсказания центров ядер клеток на иммуногистохимических изображениях раковых тканей с использованием CNN U-Net, имеющей сравнительно простую архитектуру и небольшое число обучаемых параметров ($< 5 \times 10^5$), который отличается от существующих использованием точечной разметки центров ядер при обучении сети. Разработан также алгоритм предварительной и заключительной обработки изображения, предоставляющей возможность анализа изображений произвольного разрешения. Метод позволяет быстро и эффективно производить подсчет количества ядер клеток на единицу площади и тем самым оценивать степень развития заболевания. Достоинством предложенного метода является отсутствие этапа постобработки результатов сегментации, заключающегося в разделении слипшихся ядер, что по своей сложности может превосходить сложность решения самой задачи сегментации. Метод может быть также использован в составе этапа постобработки результатов сегментации ядер для генерации центров ядер с помощью метода водораздела, а также для генерации предполагаемых центров объектов при объектной сегментации.

Произвести автоматизированный подсчет количество ядер на предсказанном изображении, являющемся результатом работы метода, не представляет труда. Необходимо лишь вычислить сумму значений всех пикселей результирующего изображения. Полное время анализа изображения размером 2048×2048 пикселей с использованием вычислителя T4 (Google Colab) составляет в среднем 750 мс, что открывает возможности анализа полнослайдовых изображений высокого разрешения за приемлемое время.

Вклад авторов. В. В. Скакун – постановка задачи, формулировка идеи разрабатываемого метода, написание введения, заключения и редакция текста статьи; Сялюнь Сюй – разработка архитектуры нейронной сети и ее обучение, разработка алгоритмов пред- и постобработки данных, написание основных разделов статьи.

Список использованных источников

1. Camp, R. L. Automated subcellular localization and quantification of protein expression in tissue microarrays / R. L. Camp, G. G. Chung, D. L. Rimm // *Nature Medicine*. – 2002. – Vol. 8, no. 11. – P. 1323–1327. – <https://doi.org/10.1038/NM791>.
2. Quantitative analysis of estrogen receptor heterogeneity in breast cancer / G. G. Chung, M. P. Zerkowski, S. Ghosh [et al.] // *Laboratory Investigation*. – 2007. – Vol. 87, no. 7. – P. 662–669. – <https://doi.org/10.1038/LABINVEST.3700543>.
3. A review and comparison of breast tumor cell nuclei segmentation performances using deep convolutional neural networks / A. Lagree, M. Mohebpour, N. Meti [et al.] // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, no. 1. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-87496-1> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.1038/S41598-021-87496-1>.
4. Automating cell counting in fluorescent microscopy through deep learning with c-ResUnet / R. Morelli, L. Clissa, R. Amici [et al.] // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, no. 1. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01929-5> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01929-5>.
5. Srinidhi, C. L. Deep neural network models for computational histopathology: A survey / C. L. Srinidhi, O. Ciga, A. L. Martel // *Medical Image Analysis*. – 2021. – Vol. 67. – Art. 101813. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361841520301778?via%3Dihub> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101813>.
6. Xie, W. Microscopy cell counting and detection with fully convolutional regression networks / W. Xie, J. A. Noble, A. Zisserman // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. – 2018. – Vol. 6, no. 3. – P. 283–292. – <https://doi.org/10.1080/21681163.2016.1149104>.
7. Сюй, С. Сравнительный анализ нейронных сетей глубокого обучения для сегментации ядер клеток на иммуногистохимических флуоресцентных изображениях раковых тканей / С. Сюй, В. В. Скакун // *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*. – 2024. – № 1. – С. 59–70.
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, Germany, 5–9 Oct. 2015. – Munich, 2015. – Part III. – P. 234–241. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28*.
9. UNet 3+: A full-scale connected UNet for medical image segmentation / H. Huang, L. Lin, R. Tong [et al.] // *IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Barcelona, Spain, 04–08 May 2020. – Barcelona, 2020. – P. 1055–1059. – <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9053405>.
10. TransUNet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation / J. Chen, Y. Lu, Q. Yu [et al.]. – 2021. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2102.04306> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.04306>.
11. Li, W. U-ResNet, a novel network fusion method for image classification and segmentation / W. Li, Z. Gao, Y. Song // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, no. 17. – Art. 5600. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5600> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.3390/S25175600>.

12. Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2017. – Vol. 42, no. 2. – P. 386–397. – <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2844175>.
13. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks / S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 39, no. 6. – P. 1137–1149. – <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2844175>.
14. Жоголь, Д. П. Анализ иммуногистохимических флуоресцентных изображений с помощью нейронных сетей глубокого обучения / Д. П. Жоголь, Л. Лисица, В. В. Скакун // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2024) : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25–26 апр. 2024 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Скакун (гл. ред.), Н. Н. Яцков, В. В. Гринёв. – Мн. : БГУ, 2024. – С. 15–18.
15. Count-ception: Counting by fully convolutional redundant counting / J. P. Cohen, G. Boucher, C. A. Glastonbury [et al.] // IEEE Intern. Conf. on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), Venice, Italy, 22–29 Oct. 2017. – Venice, 2017. – P. 18–26. – <https://doi.org/10.1109/ICCVW.2017.9>.
16. Deep learning and transfer learning for automatic cell counting in microscope images of human cancer cell lines / F. Lavitt, D. J. Rijlaarsdam, D. van der Linden [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, no. 11. – Art. 4912. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/4912> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.3390/APP11114912>.
17. Beyond classification: Structured regression for robust cell detection using convolutional neural network / Y. Xie, F. Xing, X. Kong [et al.] // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 : 18th Intern. Conf., Munich, Germany, 5–9 Oct. 2015. – Munich, 2015. – Part III. – P. 358–365. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_43.
18. Deep voting: A robust approach toward nucleus localization in microscopy images / Y. Xie, X. Kong, F. Xing [et al.] // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 : 18th Intern. Conf., Munich, Germany, 5–9 Oct. 2015. – Munich, 2015. – Part III. – P. 374–382. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_45.
19. Mitosis detection in breast cancer histology images with deep neural networks / D. C. Ciresan, A. Giusti, L. M. Gambardella, J. Schmidhuber // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2013 : 16th Intern. Conf., Nagoya, Japan, 22–26 Sept. 2013. – Nagoya, 2013. – Part II. – P. 411–418. – <https://doi.org/10.1609/aaai.v30i1.10140>.
20. Jin, X. CellRegNet: Point annotation-based cell detection in histopathological images via density map regression / X. Jin, H. An, M. Chi // Bioengineering. – 2024. – Vol. 11, no. 8. – Art. 814. – URL: <https://www.mdpi.com/2306-5354/11/8/814> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING11080814>.
21. Proximity adjusted centroid mapping for accurate detection of nuclei in dense 3D cell systems / T. Van De Looverbosch, S. De Beuckeleer, F. De Smet [et al.] // Computers in Biology and Medicine. – 2025. – Vol. 185. – Art. 109561. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482524016469?via%3Dihub> (date of access: 21.01.2026). – <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2024.109561>.
22. Locality sensitive deep learning for detection and classification of nuclei in routine colon cancer histology images / K. Sirinukunwattana, S. E. Ahmed Raza, Y.-W. Tsang [et al.] // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2016. – Vol. 35, no. 5. – P. 1196–1206. – <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2525803>.
23. Efficient and robust cell detection: A structured regression approach / Y. Xie, F. Xing, X. Shi [et al.] // Medical Image Analysis. – 2018. – Vol. 44. – P. 245–254. – <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.003>.

24. Unleashing the power of prompt-driven nucleus instance segmentation / Z. Shui, Y. Zhang, K. Yao, C. Zhu // 18th European Conf. on Computer Vision, ECCV 2024, Milan, Italy, 29 Sept. – 4 Oct. 2024. – Milan, 2024. – Vol. 15085. – P. 288–304. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-73383-3_17.

25. Xu, S. Comparison of deep learning preprocessing algorithms of nuclei segmentation on fluorescence immunohistology images of cancer cells / S. Xu, V. V. Skakun // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2021) : Proc. of the 15th Intern. Conf., 21–24 Sept. 2021, Minsk, Belarus / ed. A. V. Tuzikov [et al.]. – Springer, 2022. – P. 166–177.

References

1. Camp R. L., Chung G. G., Rimm D. L. Automated subcellular localization and quantification of protein expression in tissue microarrays. *Nature Medicine*, 2002, vol. 8, no. 11, pp. 1323–1327. <https://doi.org/10.1038/NM791>.
2. Chung G. G., Zerkowski M. P., Ghosh S., Camp R. L., Rimm D. L. Quantitative analysis of estrogen receptor heterogeneity in breast cancer. *Laboratory Investigation*, 2007, vol. 87, no. 7, pp. 662–669. <https://doi.org/10.1038/LABINVEST.3700543>.
3. Lagree A., Mohebpour M., Meti N., Saednia K., Lu F. I., ..., Tran W. T. A review and comparison of breast tumor cell nuclei segmentation performances using deep convolutional neural networks. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-87496-1> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.1038/S41598-021-87496-1>.
4. Morelli R., Clissa L., Amici R., Cerri M., Hitrec T., ..., Zoccoli A. Automating cell counting in fluorescent microscopy through deep learning with c-ResUnet. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01929-5> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01929-5>.
5. Srinidhi C. L., Ciga O., Martel A. L. Deep neural network models for computational histopathology: A survey. *Medical Image Analysis*, 2021, vol. 67, art. 101813. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361841520301778?via%3Dihub> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101813>.
6. Xie W., Noble J. A., Zisserman A. Microscopy cell counting and detection with fully convolutional regression networks. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 283–292. <https://doi.org/10.1080/21681163.2016.1149104>.
7. Xu Silun, Skakun V. V. *Comparative analysis of deep learning neural networks for the segmentation of cancer cell nuclei on immunohistochemical fluorescent images*. Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Informatika [Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics], 2024, no. 1, pp. 59–70 (In Russ.).
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, Germany, 5–9 October 2015*. Munich, 2015, part III, pp. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.
9. Huang H., Lin L., Tong R., Hu H., Zhang Q., ..., Wu J. UNet 3+: A full-scale connected UNet for medical image segmentation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Barcelona, Spain, 04–08 May 2020*. Barcelona, 2020, pp. 1055–1059. <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9053405>.

10. Chen J., Lu Y., Yu Q., Luo X., Adeli E., ..., Zhou Y. *TransUNet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation*, 2021. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2102.04306> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.04306>.
11. Li W., Gao Z., Song Y. U-ResNet, a novel network fusion method for image classification and segmentation. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 17, art. 5600. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5600> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.3390/S25175600>.
12. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 42, no. 2, pp. 386–397. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2844175>.
13. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2844175>.
14. Zhogol' D. P., Lisica L., Skakun V. V. *Analysis of immunohistochemical fluorescence images using deep learning neural networks*. Komp'yuternye tehnologii i analiz dannyh (CTDA'2024): materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 25–26 aprelja 2024 g. [Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2024): Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Minsk, 25–26 April 2024]. Ed. board: V. V. Skakun, N. N. Jackov, V. V. Griniov. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet, 2024, pp. 15–18 (In Russ.).
15. Cohen J. P., Boucher G., Glastonbury C. A., Lo H. Z., Bengio Y. Count-ception: Counting by fully convolutional redundant counting. *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), Venice, Italy, 22–29 October 2017*. Venice, 2017, pp. 18–26. <https://doi.org/10.1109/ICCVW.2017.9>.
16. Lavitt F., Rijlaarsdam D. J., Linden D. van der, Weglarz-Tomczak E., Tomczak J. M. Deep learning and transfer learning for automatic cell counting in microscope images of human cancer cell lines. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 11, art. 4912. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/4912> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.3390/APP11114912>.
17. Xie Y., Xing F., Kong X., Su X., Yang L. Beyond classification: Structured regression for robust cell detection using convolutional neural network. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 : 18th International Conference, Munich, Germany, 5–9 October 2015*. Munich, 2015, part III, pp. 358–365. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_43.
18. Xie Y., Kong X., Xing F., Liu F., Su H., Yang L. Deep voting: A robust approach toward nucleus localization in microscopy images. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 : 18th International Conference, Munich, Germany, 5–9 October 2015*. Munich, 2015, part III, pp. 374–382. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_45.
19. Ciresan D. C., Giusti A., Gambardella L. M., Schmidhuber J. Mitosis detection in breast cancer histology images with deep neural networks. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2013 : 16th International Conference, Nagoya, Japan, 22–26 September 2013*. Nagoya, 2013, part II, pp. 411–418. <https://doi.org/10.1609/aaai.v30i1.10140>.
20. Jin X., An H., Chi M. CellRegNet: Point annotation-based cell detection in histopathological images via density map regression. *Bioengineering*, 2024, vol. 11, no. 8, art. 814. Available at: <https://www.mdpi.com/2306-5354/11/8/814> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING11080814>.
21. Loooverbosch T. Van De, Beuckeleer S. De, Smet F. De, Sijbers J., Vos W. H. De. Proximity adjusted centroid mapping for accurate detection of nuclei in dense 3D cell systems. *Computers in Biology and Medicine*, 2025, vol. 185, art. 109561. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482524016469?via%3Dihub> (accessed 21.01.2026). <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.109561>.

22. Sirinukunwattana K., Ahmed Raza S. E., Tsang Y.-W., Snead D. R. J., Cree I. A., Rajpoot N. M. Locality sensitive deep learning for detection and classification of nuclei in routine colon cancer histology images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2016, vol. 35, no. 5, pp. 1196–1206. <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2525803>.
23. Xie Y., Xing F., Shi X., Kong X., Su H., Yang L. Efficient and robust cell detection: A structured regression approach. *Medical Image Analysis*, 2018, vol. 44, pp. 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.003>.
24. Shui Z., Zhang Y., Yao K., Zhu C. Unleashing the power of prompt-driven nucleus instance segmentation. *18th European Conference on Computer Vision, ECCV 2024, Milan, Italy, 29 September – 4 October 2024*. Milan, 2024, vol. 15085, pp. 288–304. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73383-3_17.
25. Xu S., Skakun V. V. Comparison of deep learning preprocessing algorithms of nuclei segmentation on fluorescence immunohistology images of cancer cells. *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2021): Proceedings of the 15th International Conference, 21–24 September 2021, Minsk, Belarus*. In A. V. Tuzikov, A. M. Belotserkovsky, M. M. Lukashevich (eds.). Springer, 2022, pp. 166–177.

Информация об авторах

Скакун Виктор Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой системного анализа и компьютерного моделирования, Белорусский государственный университет.
E-mail: skakun@bsu.by
<https://orcid.org/0000-0003-0880-4188>

Сюй Сылунь, соискатель кафедры системного анализа и компьютерного моделирования, Белорусский государственный университет.
E-mail: xusilun@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1356-0897>

Information about the authors

Victor V. Skakun, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Head of Department System Analysis and Computer Modeling, Belarusian State University.
E-mail: skakun@bsu.by
<https://orcid.org/0000-0003-0880-4188>

Silun Xu, Applicant at the Department of System Analysis and Computer Modeling, Belarusian State University.
E-mail: xusilun@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1356-0897>

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 338.49, 338.24
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-39-67>

Поступила в редакцию | Received 26.05.2026
Подписана в печать | Accepted 16.06.2026
Опубликована | Published 30.06.2026

Проблема превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования

А. Г. Давыдовский^{1✉}, С. В. Кругликов²
✉E-mail: agd2011@list.ru

¹Институт информационных технологий
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники,
ул. Козлова, 28, Минск, 220037, Беларусь

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

Аннотация

Цели. Целью работы является анализ задачи превентивного управления рисками возникновения проблемных ситуаций и инцидентов при функционировании «умных сообществ» как нуклеарных структур больших организационных систем в условиях глобальной турбулентности на основе математических моделей с использованием интеграла Винера и винеровской энтропии.

Методы. Использован анализ литературных источников, метод математического моделирования с помощью интеграла Винера и феномена винеровской энтропии для превентивного управления рисками в «умных сообществах» как нуклеарных структурах больших организационных систем различного назначения в условиях влияния факторов глобальной турбулентности.

Результаты. Представлена общая характеристика проблемы превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах» как нуклеарных организационных системах. Обоснована целесообразность применения интеграла Винера и винеровской энтропии для анализа и превентивного управления рисками в «умных сообществах» в условиях системной турбулентности. Предложены математические модели, обеспечивающие различные этапы превентивного управления рисками проблемных ситуаций и опасных инцидентов в «умных сообществах» больших организационных систем на основе интеграла Винера. В частности, это модель идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера, модель раннего обнаружения и прогнозирования, модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками. Кроме того, предложены численные алгоритмы и валидация моделей, а также алгоритмы превентивного управления рисками в «умных сообществах».

Заключение. Разработаны основы подхода к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» как нуклеарных структурах больших организационных систем на основе интеграла Винера и винеровской энтропии.

Ключевые слова: глобальная турбулентность, большие организационные системы, «умные сообщества», интеграл Винера, винеровская энтропия, превентивное управление рисками, стохастическое моделирование

Для цитирования. Давыдовский, А. Г. Проблема превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования / А. Г. Давыдовский, С. В. Кругликов // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 39–67. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-39-67>.

Конфликт интересов. С. В. Кругликов является членом редакционной коллегии журнала «Информатика» с 2016 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.

The problem of preventive risk management in "smart communities" based on stochastic simulation

Anatoly G. Davidovsky^{1✉}, Sergey V. Kruglikov²

✉E-mail: agd2011@list.ru

¹*Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, st. Kozlova, 28, Minsk, 220037, Belarus*

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

Abstract

Objectives. The study aims to analyze the problem of preventive risk management for problematic situations and incidents in the functioning of "smart communities" as nuclear structures of large organizational systems under conditions of global turbulence based on mathematical models using the Wiener integral and Wiener entropy.

Methods. A review of the literature, a method of mathematical modeling using the Wiener integral and Wiener entropy phenomenon are applied for preventive risk management in "smart communities" as nuclear structures of large organizational systems for various purposes under the influence of global turbulence factors.

Results. A general description of the problem of preventive incident risk management in "smart communities" as nuclear structures of organizational systems has been presented. The expediency of using the Wiener integral and Wiener entropy for analysis and preventive risk management in "smart communities" in conditions of systemic turbulence is substantiated. Mathematical models are proposed that provide various stages of preventive risk management for problematic situations and dangerous incidents in "smart communities" within large organizational systems based on the Wiener integral. In particular, it is a risk identification and assessment model based on the Wiener integral, an early detection and forecasting model, and a model for optimizing preventive risk management strategies. In addition, numerical algorithms and model validation are proposed, as well as algorithms for preventive risk management in "smart communities".

Conclusion. The fundamentals of the approach to preventive incident risk management in "smart communities" as nuclear structures of large organizational systems based on the Wiener integral and Wiener entropy have been developed.

Keywords: global turbulence, large organizational systems, smart communities, Winner's integral, Wiener entropy, preventive risk management, stochastic simulation

For citation. Davidovsky A. G., Kruglikov S. V. *The problem of preventive risk management in "smart communities" based on stochastic simulation*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 2, pp. 39–67 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-39-67>.

Conflict of interests. S. V. Kruglikov has been a member of the editorial board of the journal "Informatics" since 2016 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

Во второй четверти XXI в. в формировании глобальной турбулентности важное значение приобретают следующие тенденции: гиперурбанизация и миграция человеческих ресурсов; экспоненциальный рост планетарной техносферы, масса которой уже сегодня значительно превосходит массу биосферы планеты и провоцирует глобальную социотехническую турбулентность [1], проявляющуюся в разрушении биосферы; разрушение традиционных социальных и производственных институтов, исторически сложившихся кооперативных сетей [2]; деградация человеческого потенциала и распространение «болезней цивилизации» [3, 4]; возникновение новых возбудителей инфекционных заболеваний и распространение эпидемий и пандемий с длительными социально-экономическими и биосоциальными последствиями (например, пандемия COVID-19 и последующий коронакризис) [5]; возрастание частоты негативных климатических событий с риском перехода в глобальную геоклиматическую катастрофу [6]; развитие цифровой ноосферы, основанной на глобальной сети Интернет с многочисленными облачными сервисами хранения информационных ресурсов; распространение военных и парамилитарных событий, кибертерроризма и радикализма [7]; переход к пятой промышленной революции и развитие производительных сил на основе конвергентных нано- и биотехнологий, робототехники, генеративных нейротехнологий, облачных и квантовых вычислений, биотехнологий (технологий генетического редактирования CRISPR/Cas-9, синтетической биологии), мобильных автономных систем (беспилотников, роботов), децентрализованных финансовых технологий (блокчейна) и т. д. [8, 9]. Такие события, как технологическая концентрация обработки больших данных, включая дата-монополии, турбулентность рынков энергетического сырья и кредитования макроэкономического развития, массовое распространение технологий социальной инженерии, нейробрендинга и фейковых сообщений на фоне биосферной и социокультурной деградации [5, 9], обуславливают техногуманитарный дисбаланс современного постиндустриального мира [10].

Если в XX в. социально-экономические или социокультурные кризисы носили преимущественно локальный или временный характер, допуская относительно предсказуемое развитие событий и последствий, то 2020-е гг. стали качественно новым этапом в развитии глобальной турбулентности, отличающейся от предшествующих кризисов такими ключевыми характеристиками, как глобальное общество тотального потребления, гиперурбанизация, сверхэксплуатация и деградация природно-биосферных ресурсов, экспоненциальный рост техносферы, нарастающая геоклиматическая, социально-экономическая и биосоциальная нестабильность [11, 12]. При этом возрастает вероятность

нарушений жизнедеятельности больших организационных систем (БОС) в производственно-хозяйственной деятельности, административном управлении, здравоохранении, образовании, сфере услуг. Учитывая многомерность и тяжесть возможных социальных и социально-экономических последствий, особое значение приобретает возможность превентивного управления рисками нарушений функционирования БОС. При этом необходимо отметить важнейшую роль так называемых «умных сообществ», являющихся объединениями человеческих ресурсов, которые формируют и интегрируют вокруг себя материальные, информационные и энергетические ресурсы и потоки, технологии, иерархические, сетевые или гибридные организационные решения, а также контролируют активность различных акторов во внутренней среде БОС. Таким образом, «умные сообщества» являются ядерными (нуклеарными) когнитивно-социальными структурами внутри БОС.

Основная функция «умных сообществ» как нуклеарных социально-когнитивных структур заключается в обеспечении высокой управляемости и адаптивности БОС в условиях глобальной турбулентности. Такие нуклеарные социально-когнитивные структуры не противостоят организационному хаосу, а используют его как информационный, энергетический и материальный ресурс, обеспечивая навигацию БОС в пространстве событий системной турбулентности. При этом важную практико-ориентированную проблему представляют научно-методическое обеспечение и аппаратно-программная реализация информационных технологий превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах», составляющих основу жизнедеятельности «умных городов», которые относятся к различным поколениям [13].

Возникает потребность в динамическом, траекторном и вероятностном критериях оценки риска для анализа степени непредсказуемости и интенсивности последствий влияния стохастической системной турбулентности как на структурно-функциональное состояние БОС в целом, так и на жизнедеятельность их функциональной основы («умных сообществ») в частности. При этом динамический критерий оценки риска предусматривает непрерывный мониторинг и анализ состояний БОС в условиях быстро изменяющейся внутренней и внешней среды с течением времени для своевременного обеспечения приемлемого уровня безопасности и устойчивости системы. Траекторный критерий оценки риска основан на вероятности потери устойчивости БОС на траектории ее движения к намеченной цели или целевому состоянию (аттрактору). С позиций вероятностного критерия можно оценить риск как возможный неблагоприятный исход функционирования или состояния БОС, который характеризуется вероятностью и ущербом от неблагоприятного последствия. С помощью вероятностного критерия оценки риска можно ответить на три основных вопроса:

- 1) какова вероятность или частота возникновения событий, приводящих к последствиям, неблагоприятным для БОС;
- 2) каков характер событий, инициирующих неблагоприятные последствия;
- 3) насколько значительным является потенциальный ущерб от событий, инициирующих неблагоприятные последствия.

В качестве такого критерия меры риска негативных событий в сложной и (или) большой системе может быть предложена винеровская энтропия рисков как функционал стохастической динамики, связанный с интегральными характеристиками броуновского

(винеровского) процесса. При этом риск можно рассматривать не только как величину ожидаемых потерь, но и как свойство стохастической динамики, отражающее вариативность траекторий динамики БОС в пространстве возможных состояний. Особый интерес представляет интеграл Винера как фундаментальный инструмент стохастического анализа латентных событий и процессов в «умных сообществах» как нуклеарных когнитивно-социальных структурах больших социально-экономических и организационных систем. Его использование позволяет описывать процессы, в которых неопределенность носит непрерывный, кумулятивный и траекторно-зависимый характер [14]. В отличие от сугубо детерминированных или дискретных моделей винеровский аппарат применим к задачам мониторинга, селекции, прогнозирования и оптимального управления в среде случайных возмущений, возникающих во внешней и внутренней среде БОС и «умных сообществ».

Целью работы является анализ задачи превентивного управления рисками возникновения проблемных ситуаций и инцидентов при функционировании «умных сообществ» как нуклеарных структур БОС в условиях глобальной турбулентности на основе математических моделей с использованием интеграла Винера – эффективного инструмента стохастического анализа и прогнозирования рисков в больших и сложных системах.

1. Факторы глобальной турбулентности

Нарастающее неравенство как фактор нестабильности. Исследования [15, 16] убедительно показали, что нарастающее неравенство между социальными группами в доступе к материальным и информационным ресурсам служит мощным фактором дестабилизации БОС ($I_{inequality}$). Для феномена социальной нестабильности в БОС авторами предложено выражение, описывающее диффузионное взаимодействие социальных акторов на основе закона Фика:

$$I_{inequality} = G_{ini}(t) \frac{dG_{ini}(t)}{dt} PU, \quad (1)$$

где $G_{ini}(t)$ – показатель нарастающего неравенства между социальными группами по отношению к материальным и информационным ресурсам с течением времени t ;

PU (perception of unjustice) – показатель восприятия социальной несправедливости общественным сознанием «умного сообщества».

Выражение (1) позволяет рассматривать и анализировать процессы социальной нестабильности в БОС на основе социофизических моделей, использующих положения теории диффузии (Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М. : Наука, 1987. – 502 с.).

Социальная поляризация и разрушение социального капитала «умных сообществ». Деградация социального капитала ослабляет способность «умных сообществ» к коллективному действию внутри и между БОС – критическому условию преодоления различных системных кризисов. Процесс деградации социального капитала можно представить с помощью дифференцируемой функции $SC(t)$:

$$\frac{dSC(t)}{dt} = (\alpha + f(T, R, N))SC(t), \quad (2)$$

где α – константа деградации социального капитала, $\alpha > 0$;

$f(T, R, N)$ – функция переменных «доверие», «взаимность», «связи» в «умных сообществах».

T – доверие, которое является характеристикой уверенности акторов (участников) социальных отношений в надежности своих партнеров, что можно охарактеризовать уровнем достоверности, %;

R – взаимность, которая является важнейшей характеристикой социального обмена и социальной жизни в целом конечный результат структурированного обмена продуктами социальной деятельности между диадическими и сетевыми партнерами;

N – как прямые, так и обратные связи между акторами социальных отношений в «умных сообществах».

Все рассмотренные переменные (2) априори являются неотрицательными.

Представленные далее выражения (2)–(6) предложены авторами на основе логистических моделей, рассмотренных в работе [17].

Миграционное давление. Нарастающие потоки вынужденной миграции вследствие экономических, социальных, климатических и конфликтных событий создают давление на принимающие общества, усиливая социальную напряженность, что можно представить с помощью дифференцируемой функции:

$$\frac{M_{forc}(t)}{dt} = (\beta + k_1 M_{clim}(t) + k_2 M_{conf}(t) + k_3 M_{econ}(t)) M_{forc}(t), \quad (3)$$

где β – константа потоков миграционного давления на «умное сообщество», $\beta > 0$;

$M_{clim}(t)$, $M_{conf}(t)$, $M_{econ}(t)$ – потоки миграции вследствие климатических причин, социальных конфликтов и экономических причин соответственно.

После простых преобразований (3) представляется вероятным, что к 2050 г. количество климатических мигрантов может составить 200–1000 млн человек [1, 3].

Кризис ценностных систем и социокультурные конфликты. Нарастающий конфликт $K(t)$ между глобалистскими и региональными, традиционалистскими и прогрессивными, секулярными и религиозными ценностными системами создает «ценностный разлом» в «умных сообществах»:

$$\frac{K(t)}{dt} = (\gamma + D(P_{values}, A(t) \| P_{values}, B(t))) K(t), \quad (4)$$

где γ – константа конфликтных отношений между группами с полярными ценностными ориентациями в «умном сообществе», $\gamma > 0$;

D – функция дивергенции между распределениями полярных ценностных ориентаций $A(t)$ и $B(t)$ двух различных социальных групп $(P, A(t))$ и $(P, B(t))$ в «умном сообществе».

Распространение дезинформации и разрушение целостной информационной картины реальности (*Information fragmentation(t)*, $IF(t)$), разнообразные алгоритмические фильтр-пузыри и эхо-камеры создают эффект «разорванной информационной ткани» в «умном сообществе», при котором различные группы граждан живут в принципиально разных информационных реальностях:

$$\frac{dIF(t)}{dt} = (\delta + V(\text{Beliefs of groups})) IF(t), \quad (5)$$

где δ – константа распространения дезинформации и разрушения целостной информационной картины реальности, $\delta > 0$;

$V(\text{Beliefs of groups})$ – функция формирования эхо-камер для различных групп внутри «умного сообщества».

На основе уравнений (4) и (5) могут быть построены модели распространения дезинформации, приводящие к кризисам ценностных систем и провоцирующие социокультурные конфликты.

Климатический кризис как системный риск. Климатические изменения представляют собой глобальный климатический риск ($CR_{total}(t)$) – фактор, мультиплицирующий все остальные риски вне и внутри БОС:

$$\frac{dCR_{total}(t)}{dt} = (\varepsilon + R_{baseline} \times \Psi_{climate}(t)) CR_{total}(t), \quad (6)$$

где ε – константа зависимости «умного сообщества» от климатических изменений;

$R_{baseline}$ – базовый уровень климатического риска;

$\Psi_{climate}$ – функция многих переменных, являющаяся климатическим мультипликатором рисков, нарастающих во времени и обусловленных неопределенностью влияния климата на внешнюю и внутреннюю среду «умного сообщества».

Механизмы влияния климата на БОС включают: физические риски, экстремальные события вследствие разрушения инфраструктуры, рост уровня моря и как следствие потеря территорий, изменение характера осадков и последующий продовольственный стресс, обесценивание углеродных активов, регуляторные изменения, индустриально-климатические и социально-климатические риски (миграция населения, конфликты за ресурсы, политическая нестабильность).

Биосоциальная турбулентность (БСТ) обозначает специфический режим дестабилизации БОС, при котором биологические (пандемические, экологические, демографические), социальные (неравенство, поляризация, миграция) и культурно-ценностные (кризис идентичностей, культурные войны, нарратив-конфликты) возмущения интерферируют, создавая качественно новые риски, не редуцируемые ни к одному из составляющих типов.

По мнению авторов, БСТ может быть описана выражением

$$BST(t) = T_{bio}(t) \otimes T_{social}(t) \otimes T_{cultural}(t), \quad (7)$$

где $T_{bio}(t)$, $T_{social}(t)$, $T_{cultural}(t)$ – турбулентности в БОС, обусловленные биологическими, социальными и культурными факторами соответственно;

⊗ – нелинейный оператор взаимодействия, учитывающий мультипликативный эффект взаимодействия факторов биологической, социальной и культурной природы.

По мнению авторов, БСТ соответствует мультипликативному эффекту взаимодействия биологических, социальных и культурных факторов, что существенно превосходит аддитивный результат их взаимодействия:

$$BST(t) > T_{bio}(t) + T_{social}(t) + T_{cultural}(t). \quad (8)$$

С помощью уравнения (7) и неравенства (8) можно описать свойство супераддитивности БОС, смысл которой заключается в том, что совокупная турбулентность превышает сумму турбулентности каждого из компонентов.

Интерференция компонентов БСТ может быть как позитивной, так и негативной. Аналогично волновой интерференции БСТ может порождать зоны конструктивной (усиливающей) и деструктивной (гасящей) интерференции. Как следует из уравнения (8), взаимная мультипликативная индукция эффектов биологических, социальных и культурных факторов в больших системах является примером их позитивной интерференции:

$${}^+BST(t) = (T_{bio}(t) + T_{social}(t) + T_{cultural}(t))^2 > T_{bio}^2(t) + T_{social}^2(t) + T_{cultural}^2(t) \quad (9)$$

при условии, что $T_{bio} > 0$, $T_{social} > 0$, $T_{cultural} > 0$.

Можно привести иллюстрации для (9). Например, возможные цепочки событий формируют автоиндуцируемые процессы: биологические (пандемия) → социальные (социальный стресс) → культурные (распространение идей конспирологии, алармизма, антиинституционализма) → экономические (локдаун) → социальные (снижение доверия к вакцинам) → биологические (усугубление пандемии). Подобная последовательность создает замкнутый контур взаимного усиления негативных событий.

Негативная интерференция обусловлена взаимным гашением при совместном влиянии факторов в больших системах.

Вследствие интерференции возможны феномены, когда высокий уровень социального доверия (социальный капитал) может гасить биологические риски путем успешной вакцинации и культурные – путем повышения устойчивости сообществ к дезинформации.

Биологические факторы. Пандемия COVID-19 продемонстрировала, как биологические угрозы способны вызывать глубочайшие экономические, социальные и политические трансформации, формирующие ситуацию глобальной турбулентности и дезорганизующие жизнедеятельность БОС в здравоохранении, образовании, логистике, сфере услуг [11]. Авторами предложена формула для оценки пандемического риска ($R_{pandemic}$) на основе функции шести переменных:

$$R_{pandemic} = F(R_0, IFR(t), \tau_{detection}, Conn_{global}, Cap_{health}, t), \quad (10)$$

где F – функция шести переменных, включая:

R_0 – базовый репродуктивный номер; $IFR(t)$ – уровень смертности от инфекций (infection fatality rate);

$\tau_{detection}$ – время до обнаружения;

$Conn_{global}$ – уровень вовлеченности;

Cap_{health} – потенциал здоровья;

t – время.

Пандемический риск можно описать непрерывной функцией после преобразования (10). Его размерность можно определить произведением вероятности распространения инфекционного заболевания на долю, которую составляют лица с клиническими признаками заболевания, от всей численности человеческой популяции.

Демографический стресс. Нарастающее демографическое расхождение между «стареющим» Севером и «молодым» Югом ($[North - d(Youth Bulge)]$) создает долгосрочный демографический дисбаланс ($\Delta_{demo}(t)$), так или иначе затрагивающий все страны северного полушария, включая Республику Беларусь. Из работы [17] следует, что явление можно охарактеризовать как демографический стресс на основе формулы дифференциального управления

$$\Delta_{demo}(t) = \zeta \frac{dOAR}{dt} [North - d(Youth Bulge)], \quad (11)$$

где ζ – константа долгосрочного демографического дисбаланса;

OAR (Old Aging Ratio) – коэффициент старения населения страны, принимающей миграционные потоки.

Принимая во внимание (1)–(11), превентивное управление рисками, возникающими в БОС, может быть основано на таких принципах, как раннее обнаружение рисков, прогнозирование сценариев, оптимизация стратегий эволюции системы. При этом в отличие от реактивного подхода к управлению рисками превентивное управление направлено на предотвращение, а не ликвидацию негативных последствий влияния рассмотренных факторов.

2. Проблема превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах»

Отдельную проблему, заслуживающую пристального внимания, представляет формализация неопределенности риска в структурно-функциональной целостности и жизнедеятельности «умных сообществ», которые являются нуклеарными социально-когнитивными структурами БОС на основе винеровских стохастических моделей.

В настоящее время очевидно противоречие между знаниями о масштабах и последствиях возникновения различных инцидентов в «умных сообществах», относящихся к различным поколениям «умных городов» и «умных урбанизированных экосистем», с одной стороны, и уровнем фундаментальных и прикладных знаний, развития моделей, алгоритмов и методов превентивного управления рисками возникновения потенциально опасных технологических, социальных, социотехнических, социально-экономических и экологических проблемных ситуаций при эволюции различных поколений «умных городов» и «умных урбанизированных экосистем», с другой стороны [15, 18].

«Умные сообщества», будучи ядром – нуклеарной социально-когнитивной структурой – БОС, в условиях нарастающих проявлений системной биосоциальной, антропо-технологической и социально-экономической турбулентности демонстрируют свойства не статической, а быстро эволюционирующей динамической структуры, способной к гибридации с сетевым управлением, распределенными ресурсами и непрерывно перестраиваемой логистикой. В связи с широким развитием технологий «умных городов» и «умных урбанизированных экосистем» представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес изучение факторов, причин и механизмов возникновения и развития различных технологических, социальных, экономических и экологических инцидентов в «умных сообществах» как эволюционирующих социотехнических системах.

Превентивное управление рисками возникновения инцидентов в больших социальных системах требует заблаговременного обнаружения «триггерных» состояний. Для описания этих явлений целесообразно использовать социофизическую стохастическую модель вероятности диффузии социальных компонентов БОС, основанную на модифицированном уравнении Фоккера – Планка для одномерного случая в частных производных (Risken, H. The Fokker-Planck Equation: Methods of Solutions and Applications. – 2nd ed. – Springer, 1984. – 452 p.), которое описывает эволюцию функции вероятности P_i состояния i -го социального компонента БОС во времени:

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} [A(x_i, t)P(x_i, t)] + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B(x_i, t)}{2} \frac{\partial}{\partial x} P(x_i, t) \right), \quad (12)$$

где $A(x_i, t)$ – функция, описывающая состояние исследуемой БОС по компоненту x_i в момент времени t ;

$B(x_i, t)$ – стандартное N -мерное броуновское движение социального компонента системы x_i ;

$P(x_i, t)$ – функция плотности вероятности, описывающая состояние социального компонента x_i как стохастический процесс.

Состояние i -го социального компонента БОС в (12) – это набор его качественных и количественных характеристик, изменение которых со временем свидетельствует о переходе в другое состояние.

Модели, подобные (12), могут быть использованы для моделирования и системного анализа социальных систем, например, в условиях глобальных миграционных кризисов и социальных конфликтов.

Одним из наиболее парадоксальных и практически значимых открытий теории сложных систем является то, что увеличение связности большой системы сверх определенного порога ведет не к повышению, а к снижению ее устойчивости. При этом гиперконцентрация ресурсов, власти и функций в узловых агентах системы создает системообразующие узлы (так называемые too big to fail-уязвимости), отказ которых неизбежно влечет системный коллапс с вероятностью $P_{ск}$ при превышении некоторого порогового уровня P_p .

Для БОС характерны сетевые структуры, узлы в которых нередко имеют много связей с другими узлами. Количество связей узла с другими узлами называется степенью

узла сети, а распределение степеней узлов определяет распределение вероятностей степеней во всей сети, которая составляет основу БОС. В таких сетях, которые можно назвать «сетями со степенным распределением» (scale-free networks), высока устойчивость к случайным отказам. Это представляет особый интерес в условиях геополитической и социально-экономической турбулентности, когда транспортные, энергетические, ресурсные хабы и дата-центры становятся чрезвычайно уязвимыми к целенаправленным атакам различного характера.

Как следует из работы [17], комплексную устойчивость БОС (sustainability $S(t)$) можно описать дифференциальным уравнением логистической функции, включающей буферную способность, резервные ресурсы и организационно-функциональную напряженность (buffering capacity, BC; reserve resources, RR; organizational and functional tension, OFT):

$$\frac{dS(t)}{dt} = (\eta + f(BC, RR, OFT))S(t), \quad (13)$$

где η – константа комплексной устойчивости БОС.

Принимая во внимание (13), необходимо отметить, что максимально оптимизированная по структуре и функциям большая система может быть минимально устойчивой как к внешним, так и внутренним возмущениям. Оптимизация по краткосрочной эффективности систематически снижает долгосрочную устойчивость БОС к воздействию условий внешней среды, в том числе вследствие феномена институционального дрейфа.

Институциональный дрейф (Δ_{inst}), обуславливающий формирование латентных рисков в БОС, – это постепенное расхождение между формальными правилами ($R_{formal}(t)$) и реальными практиками акторов, обеспечивающих функционирование БОС ($R_{actual}(t)$), что создает скрытые уязвимости, которые становятся видимыми только на продолжительных интервалах времени в условиях организационного стресса. При этом институциональный дрейф можно представить как вектор в нормированном векторном пространстве [19]:

$$\vec{\Delta}_{inst} = \|\vec{R}_{formal}(t) - \vec{R}_{actual}(t)\|t. \quad (14)$$

Регуляторный лаг (14) – это временной разрыв между появлением нового риска в БОС и формированием адекватного регуляторного ответа в условиях ускорения технологических трансформаций (например, при внедрении искусственного интеллекта (ИИ) в процессы принятия управленческих решений) – может значительно увеличиться. Для цифровых технологий (ИИ, криптоактивы, социальные сети) этот лаг составляет от 3 до 15 лет, в течение которых системы функционируют в правовом и образовательном вакууме, накапливая системные риски.

Нарастающая полицентричность в глобальной мировой системе при одновременной деградации традиционных институтов управления формирует «управленческий вакуум» для глобальных факторов, создающих риски функционирования БОС и способствует фрагментации управления ими.

Возникающие технологические разрывы и «сдвиги парадигм» приводят к быстрому обесцениванию и деградации существующих компетенций персонала, инфраструктур и бизнес-моделей БОС вследствие появления принципиально новых технологий, таких как интернет вещей, робототехнические комплексы, беспилотный транспорт и ИИ [11, 12]. Данные факторы при совместном влиянии способны вызвать длительные дестабилизирующие эффекты в больших социально-экономических системах, например производственных объединениях, холдингах, логистических хабах, многопрофильных индустриальных компаниях, а также организациях образования, здравоохранения и жилищно-коммунальной сфере. Это создает новый тип системного риска – информационную гегемонию с возможностью манипуляции принятием решений миллиардами человек на основе обработки потоков больших данных. При этом возрастает технологическая уязвимость объектов критической инфраструктуры – энергетики, транспорта, финансовой сферы, здравоохранения, медиа. В период с 2021 по 2026 г. стремительный рост демонстрируют атаки на цепочки поставок, что приобретает особое значение в контексте усложнения глобальных логистических связей и растущей зависимости от технологических партнеров¹. Увеличение риска киберугроз создает системную уязвимость нового типа с тяжелыми социально-экономическими последствиями.

3. Превентивное управление рисками инцидентов в «умных сообществах» как стохастический процесс

Переход к превентивному управлению рисками представляет собой идентификацию, прогнозирование и нейтрализацию рисков до их реализации и является императивом современной теории и практики управления сложными системами. При этом в жизнедеятельности «умных сообществ» ключевую роль играют социальные, технологические, технические, киберфизические, экономические, управленческие, институциональные риски деградации человеческого капитала, а также экологические, биотоксикологические, информационно-психологические, психофизиологические и инклюзивные риски [5].

Превентивное управление всем комплексом таких рисков в «умных сообществах», соответствующих различным поколениям «умных городов», – это комплексный процесс, направленный на выявление, оценку и минимизацию потенциальных угроз для устойчивой и безопасной жизнедеятельности «умных сообществ» на основе использования разнообразных методов, алгоритмов и сценариев, учитывающих технические, социальные, экологические и экономические аспекты. Технологии превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах» целесообразно основывать на стохастических, байесовских и биоинспирированных моделях и алгоритмах оптимизации.

Эволюция «умного сообщества» как нуклеарной когнитивно-социальной структуры, составляющей основы БОС, осуществляется в пространстве состояний, соответствующих различным событиям $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, может быть описана стохастическим дифференциальным уравнением [14]

$$\frac{S(t)}{dt} = f(x(t), u(t), t) + \frac{1}{dt} \sum_{k=1}^n (x(t)_i, u(t)_j, t) dW_{ij}(t), \quad (15)$$

¹Критическая инфраструктура и стратегическая стабильность в эпоху конвергенции угроз. – URL: <https://ru.valdaiclub.com/a/highlights/stratstabilnost-v-epokhu-konvergensii-ugroz/> (дата обращения: 23.06.2026).

где $x(t)$ – i -й компонент БОС;

$u(t)$ – j -е управляющее воздействие (политика управления) в БОС;

$W(t)$ – винеровский процесс (возможно, многомерный, с согласованной размерностью) в отношении i -го компонента и j -го управляющего воздействия в БОС;

f – дрейф (детерминированная динамика);

$\sum_{k=1}^n (x(t)_{ki}, u(t)_{kj}, t) dW(t)$ – сумма, описывающая все винеровские процессы стохастических возмущений при управлении БОС.

В качестве компонента (t) может выступать активный актор, технология, бизнес-процесс, информационный, материальный, энергетический ресурс, иерархический уровень и узел сети в организационной структуре БОС.

Для описания эволюции «умного сообщества» (15) необходим винеровский процесс (броуновское движение) $W_{ij}(t)$ при $t \in [0, T]$, который может быть представлен как случайный вектор $(W_{t_1}, W_{t_2}, \dots, W_{t_n})$, $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n \leq T$, имеющий гауссовское распределение с траекторией, непрерывной при всех $t \in [0, T]$.

Предположим, что риск негативных событий в БОС проявляется через траектории $x(t)$. Введем безопасное множество $S \subset \mathbb{R}^n$. Риск R_S можно интерпретировать как выход системы из некоторого состояния S . При этом важную роль играет неопределенность внутри траектории эволюции «умного сообщества» БОС. Для решения данной задачи целесообразно ввести энтропийную (информационную) характеристику.

4. Винеровская энтропия рисков в «умных сообществах» в условиях системной турбулентности

В контексте энтропии как «меры непредсказуемости» стохастических процессов энтропийные меры часто интерпретируют как величины, описывающие степень неопределенности распределения траекторий. Для винеровской динамики естественно связывать эту неопределенность с интенсивностью диффузионной компоненты и потерями (затратами) информационных ресурсов, необходимыми для изменения мер вероятности на пространстве траекторий.

В настоящей работе предложена гипотеза винеровской энтропии рисков как вероятностного функционала, задающего объем и непредсказуемость траекторий состояний «умного сообщества» БОС под влиянием факторов глобальной турбулентности в терминах интеграла Винера и связанных с ним стохастических процессов. Ниже предварительно показано, что введенная мера энтропии позволяет:

- количественно различать режимы турбулентности неопределенности;
- конструировать ранние индикаторы ухудшения состояния системы;
- увязывать риск с принципами управления по ограничению вероятности выхода из безопасного множества и по хвостовым критериям.

Представлены аналитические свойства винеровской энтропии в базовой постановке, а также схема численной оценки и интерпретации для практических задач управления. На уровне методологии обсуждаются границы применимости и направления дальнейших исследований.

Пусть в рассматриваемой модели стохастическая часть задается винеровским процессом, а функциональный риск $R[x(\cdot)]$ учитывает небезопасность траектории. При этом вводится понятие винеровской энтропии рисков [14]:

$$\varepsilon_W(R) = -\mathbb{E}[\log P_R(R[x(\cdot)])], \quad (16)$$

где $P_R(\cdot)$ – плотность (или обобщенная плотность) распределения риска $R[x(\cdot)]$.

Вместе с тем винеровская энтропия рисков (16) достаточно сложна для аналитического вывода. Поэтому применяется эквивалентная постановка в терминах энтропии правдоподобия и относительной энтропии между мерами траекторий в режиме риска и базовом (контрольном) режиме.

Винеровскую энтропию можно связать с параметрами диффузии и интенсивностью управляющего воздействия, необходимого для перехода БОС в режим с повышенным риском.

Свойства винеровской энтропии и связь с интегралом Винера. Пусть происходит изменение меры посредством сдвига дрейфа на величину $\theta(t)$, согласованную с диффузией. Тогда энтропийная характеристика системы может быть выражена с помощью интеграла вида [14]

$$\int_0^T \theta(t)^T dW(t), \quad (17)$$

где $W(t)$ – винеровский процесс с энтропией.

При фиксированной форме управления событием, приводящим к риску, увеличение диффузионной составляющей, например интенсивности винеровской турбулентности, неизбежно приводит к возрастанию энтропии в системе, что можно рассматривать как индикатор деградации большой системы под влиянием накапливающихся в ней нарушений и поломок. Процесс такой деградации большой системы может быть охарактеризован с помощью интеграла (17).

Как следует из уравнения (16), энтропия зависит от того, как именно задан $R[x(\cdot)]$ (выход за границу, хвостовые потери, комбинированная штрафная функция). Интеграл Винера хорошо описывает броуновскую диффузию, но в ряде прикладных ситуаций могут доминировать «скачки», «спайки» или «тяжелые хвосты» распределения. Тогда требуется расширение до процессов с разрывами или обобщенных диффузий. Ошибки в оценке диффузии напрямую изменяют энтропийную меру.

Подход с применением винеровской модели может быть использован для анализа рисков в широком спектре больших социально-экономических систем. При этом $x(t)$ является вектором макропоказателей (волатильность, ликвидность, показатели напряженности, интегральные индексы неопределенности). Стохастическая составляющая моделирует внешние шоки, неучтенные факторы, шум наблюдения и неполную идентификацию. Биосоциальные кризисы проявляются как события выхода в критическую область (например, превышение порогов неустойчивости). Винеровская энтропия может

использоваться для различения периода нормальной вариативности и периода достижения кризисного режима за счет достаточно меньшего смещения. При этом БОС становится статистически ближе к опасному переходу.

Триггерами превентивного вмешательства для обеспечения устойчивого функционирования БОС являются критерии, формируемые на основе $\epsilon_{W(t)}$ и определяемые локально по окну наблюдений: когда энтропия превышает порог, следует активировать профилактические меры; когда энтропийная динамика ускоряется, необходимо менять политику управления заранее.

Энтропийное ограничение позволяет действовать на неопределенность траекторий, а не только на средний уровень риска дезорганизации функционирования «умных сообществ» как нуклеарных когнитивно-социальных структур, обеспечивающих быструю рефлексивную и превентивную адаптацию БОС к рискам инцидентов, обусловленным влиянием факторов глобальной турбулентности.

Существующие модели превентивного управления можно условно разделить на три группы:

- пороговые индикаторные модели;
- сценарно-экспертные модели;
- модели машинного обучения и прогнозной аналитики.

Индикаторные модели просты, но слабо чувствительны к скрытым изменениям режима функционирования больших и сложных систем, в которых присутствует эффект «шума событий». Сценарные модели учитывают контекст, но зависят от субъективности экспертов. Модели машинного обучения способны обнаруживать сложные зависимости, однако нередко страдают недостаточной интерпретируемостью и нестабильностью при изменении режима генерации данных. В этой ситуации математически прозрачные стохастические модели, основанные на интеграле Винера, позволяют занять промежуточную позицию между строгостью, интерпретируемостью и адаптивностью.

В отличие от обычного интеграла Римана – Стильбеса интеграл Винера определяется по траекториям, не имеющим ограниченной вариации. В отличие от стохастических интегралов более общего типа он выступает базовой конструкцией для моделирования броуновских шумов и непрерывных случайных флуктуаций.

Как следует из работы [14], в ряде случаев динамика состояния системы $X(t)$ может быть определена стохастическим дифференциальным уравнением

$$dX(t) = a(x(t), u(t))dt + b(x(t), u(t))dW(t). \quad (18)$$

Тогда риск критического события в БОС, формируемый со временем, может быть определен как вероятность достижения опасного состояния. Процесс достижения системой такого состояния может быть описан с помощью уравнений (16)–(18).

Важно учитывать факт достижения не только критической области, но и предкризисных флуктуаций и как следствие – накопление рисков возникновения проблемных ситуаций в организационных, организационно-технических и социально-экономических системах. В этой связи, по мнению авторов, целесообразно ввести функционал траектории риска нарушения управляемости (дезорганизации) «умного сообщества» как ядра более крупной, но организационно менее сложноструктурированной большой системы:

$$R(t) = \mathbb{E} \left[\int_0^T q(X(t), t) + \Psi(X(T)) + \lambda \sup_{t \in [0, T]} h(X(t)) \right], \quad (19)$$

где $q(X(t), t)$ характеризует текущую интенсивность риска, $\Psi(X(T))$ отражает терминальный ущерб, $h(X(t))$ описывает близость к опасному режиму функционирования «умного сообщества».

Следует отметить, что уравнение (19) позволяет учитывать микрофлуктуации, часто предшествующие кризису управляемости БОС. При этом использование винеровского интеграла дает возможность моделировать диффузионную составляющую неопределенности, представленную непрерывными малыми флуктуациями, накапливающимися во времени. Эволюцию события X_t позволяет описать стохастическое дифференциальное уравнение вида [14]

$$dX_t = \mu(t, X_t)dt + \sigma(t, X_t)dW_t, \quad (20)$$

где μ – детерминированный дрейф (тренд);

σ – коэффициент волатильности (интенсивность случайного воздействия).

Превентивное управление рисками в БОС в контексте уравнений (19) и (20) означает воздействие на параметры μ и σ с целью удержания траектории X_t состояний системы в допустимой области до достижения критического порога.

5. Подход к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» на основе интеграла Винера

Для обоснования целесообразности подхода к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» как нуклеарных социально-когнитивных структурах БОС в условиях воздействия факторов глобальной турбулентности можно рассмотреть управляемую стохастическую систему на основе положений, представленных в [14]

$$dX_t = f(t, X_t, u_t)dt + G(t, X_t)dW_t, \quad X_0 = x_0, \quad (21)$$

где $X_t \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния системы (многомерный вектор рисков факторов);

$u_t \in U \subset \mathbb{R}^m$ – вектор управляющих воздействий (превентивных мер);

$f: [0, T]$ – функция дрейфа;

$G: [0, T]$ – матрица диффузии;

$W_t \in \mathbb{R}^n$ – многомерный процесс Винера;

n – число возможных состояний системы;

m – число возможных управляющих воздействий в системе.

С учетом равенства (21) в общем случае задача превентивного управления $J(u)$ может быть сформулирована как задача стохастической оптимизации [19]

$$\min_{u \in U} J(u) = \mathbb{E} \left[\int_0^T L(t, X_t, u_t)dt + \Psi(X_T) \right], \quad (22)$$

где $L(t, X_t, u_t)$ – текущие затраты на мероприятия по превентивному управлению рисками потери устойчивости БОС и больших организационно-технических систем;

$\Psi(X_T)$ – терминальные функции потерь в условиях воздействия факторов глобальной турбулентности.

Модель идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера. Пусть наблюдаемый процесс $Y(t)$ связан со скрытым состоянием риска $Z(t)$ следующим образом:

$$Y(t) = H(X(t), Z(t), t) + \varepsilon(t), \quad (23)$$

где $\varepsilon(t)$ – информационный шум наблюдения состояния БОС.

Тогда скрытое состояние риска $Z(t)$ в (23) можно оценить с помощью моделей линейной или нелинейной регрессии с учетом количества и характера взаимосвязи уровня параметров функциональной и организационной сложности БОС и соответствующего «умного сообщества».

Как следует из [14], динамика скрытого риска может быть выражена уравнением

$$dZ(t) = \alpha_Z(Z(t), X(t), t)dt + \beta_Z(Z(t), X(t), t)dW(t), \quad (24)$$

где α_Z и β_Z – функции от $Z(t)$, $X(t)$ и t .

Допуская динамику скрытого риска (24), а также на основе (20), (21) и (24) можно определить мгновенный риск как функцию нескольких переменных

$$r(t) = f(X(t), Z(t), u(t), t), \quad (25)$$

а агрегированный риск негативных событий в БОС на горизонте $[t, t + \tau]$ – равенством

$$R_{t,T} = \mathbb{E}_t \left[\int_t^{t+\tau} r(s) ds + X(\tau_c \leq t + \tau) \right], \quad (26)$$

где τ_c – момент первого достижения критической области диапазона риска потери устойчивости БОС.

На основе (25) и (26) могут быть выделены наблюдаемые симптомы изменения состояния БОС из скрытой стохастической динамики нарастания риска.

Модель раннего обнаружения и прогнозирования рисков. Для раннего обнаружения вводится предиктор приближения к критическому режиму:

$$S(t) = \int_{t-\Delta}^t \kappa(t-s)dW(s), \quad (27)$$

где $\kappa(\cdot)$ – ядро чувствительности системы к недавним флуктуациям во внешней среде.

Рост дисперсии и автокорреляции функционала $S(t)$ в уравнении (27) интерпретируется как индикатор критического замедления или приближения к бифуркационному режиму. При этом вероятность условного перехода системы в опасное состояние на горизонте τ :

$$P_c(t, \tau) = \mathbb{P}_t(\tau_c \leq t + \tau | R(t)). \quad (28)$$

В целом на основе положений (25)–(28) может быть осуществлено прогнозирование рисков приближения БОС к критическому режиму.

Модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками. Оптимальное превентивное управляющее воздействие U^* выбирается из множества допустимых. По мнению авторов, модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками U^* можно представить как решение задачи

$$U^* = \operatorname{argmin}_{u \in U} \mathbb{E} \left[\int_0^T (c_1 r(t) + c_2 \|U(t)\|^2 + c_3 \varphi(X(t))) dt + c_4 \Gamma(X(T)) \right], \quad (29)$$

где c_1 – задает цену текущего риска;

c_2 – отражает стоимость управляющего воздействия;

c_3 – определяет потенциальный штраф при нахождении системы в зоне уязвимости;

c_4 – учитывает терминальные потери;

$\Gamma(X(T))$ – функция гамма-распределения состояния системы в период времени T .

Интеграл Винера входит в модель (29) не как вспомогательный элемент, а как базовый механизм описания неопределенности, влияющий и на оценку риска, и на стратегии превентивного управления рисками в БОС.

Численные алгоритмы и валидация моделей. Для систем с нелинейной динамикой целесообразно применять метод Монте-Карло с квазислучайными последовательностями Соболя для приближенного вычисления функционалов Винера. Валидацию следует проводить методом кросс-валидации на временных рядах с такими метриками, как Mean Squared Error (MSE) – среднеквадратичное отклонение, Information Ratio – коэффициент информационного отношения, Lead Time – среднее время опережения сигнала предупреждения по отношению к решению риска.

Необходимо построить модель, которая идентифицирует формирующиеся риски на ранней стадии; оценивает вероятность и интенсивность перехода к критическому состоянию; вырабатывает оптимальное превентивное воздействие с учетом ограничений по ресурсам, времени и допустимым последствиям. Для этого вводится архитектура модели с тремя уровнями: состояния системы, скрытого процесса риска и управления.

Алгоритмы превентивного управления рисками в «умных сообществах». Для алгоритмизации превентивного управления рисками инцидентов дезорганизации в «умных сообществах» предложена методология, которая реализуется в виде последовательности вычислительных процедур, организованных в три различных алгоритма: идентификации скрытого риска, раннего обнаружения критических режимов, оптимизации превентивного управляющего воздействия.

В частности, алгоритм 1 идентификации скрытого риска включает:

- сбор многоканальных временных рядов по индикаторам состояния системы;
- предварительную фильтрацию шумов и устранение выбросов;

– оценку параметров $\alpha(\cdot)$ и $\beta(\cdot)$ на основе методов максимального правдоподобия или байесовской фильтрации;

– реконструкцию скрытого процесса риска $Z(t)$.

Алгоритм 2 раннего обнаружения критических режимов включает:

- расчет винеровских функционалов на скользящем окне;
- оценку условной вероятности достижения критической области;
- сравнение текущих значений с адаптивными порогами;
- генерацию предупреждения и ранжирование рисков по критичности.

Алгоритм 3 оптимизации превентивного управляющего воздействия включает:

- задание множества допустимых действий;
- моделирование траекторий системы методом Монте-Карло;
- оценку ожидаемого ущерба и стоимости вмешательства;
- поиск стратегии, минимизирующей функционал потерь;
- пересчет стратегии в режиме «удаляющегося горизонта» при поступлении новых данных.

В рамках предлагаемого подхода представлены математические модели, обеспечивающие различные этапы превентивного управления рисками проблемных ситуаций и опасных инцидентов в «умных сообществах» БОС на основе использования интеграла Винера. В частности, это модель идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера, модель раннего обнаружения и прогнозирования, модель оптимизации стратегий превентивного управления рисками. Кроме того, предложены численные алгоритмы и валидация моделей, а также алгоритмы превентивного управления рисками в «умных сообществах».

===== 6. Режимы функционирования «умных сообществ» в условиях глобальной турбулентности

В условиях глобальной социально-экономической, социотехнической и биосоциальной турбулентности режимы функционирования «умных сообществ» как ядра БОС могут обеспечивать их устойчивость через адаптацию, сохранение целостности, самоорганизацию и реорганизацию либо деградацию и дезорганизацию. Данные процессы определяют их способность выживать и эволюционировать. В этих условиях можно выделить шесть ключевых режимов функционирования «умных сообществ» в БОС: выживания (реактивный), ограничения деятельности и потребления ресурсов (режим сжатия), адаптивной стабилизации (регулирующий), трансформации (проактивный), сценарной гибридизации в соответствии с прогнозируемыми вызовами (превентивный), дезорганизации и саморазрушения (эсхатологический).

В режиме выживания (реактивном) «умные сообщества» реагируют на немедленные угрозы, фокусируясь на базовом сохранении целостности. При этом адаптация БОС к внешним вызовам минимальна, преобладает рефлекторная самоорганизация: сокращение внешних связей, мобилизация внутренних ресурсов. Например, локальные социальные группы во время кризиса перераспределяют ресурсы (еду, энергию, территорию, человеческий потенциал), нередко игнорируя долгосрочные планы. Цель таких действий – сохранение БОС.

Режим ограничения деятельности и потребления ресурсов (режим сжатия) сосредотачивает усилия сообщества на ресурсо- и энергосбережении в условиях глобальной турбулентности. «Умное сообщество» ограничивает свои потребности, сокращает (сжимает) масштабы, минимизируя расход ресурсов для поддержания ограниченного функционирования БОС, ее самоорганизации, ужесточения иерархии и рационализации структур. Например, «умный город» в условиях дефицита энергоресурсов может снизить потребление на 30–50 %, отключая малосущественные сервисы. Это стабилизирует систему, но тормозит рост.

Режим адаптивной стабилизации (регулирующий) заключается в том, что сообщество активно регулирует внутренние процессы для баланса. Адаптация сочетается с реорганизацией на основе использования алгоритмов ИИ, которые оптимизируют потоки данных и ресурсы. Так, цифровые платформы наподобие SingularityNET корректируют цепочки поставок в реальном времени. Целостность БОС сохраняется через циклы, обеспечивая обратные связи, что минимизирует хаос.

Режим трансформации (проактивный) предусматривает перестройку структур под возможные сценарии превентивного управления рисками. Самоорганизация эволюционирует в инновационные формы, такие как децентрализованные логистические сети и сети услуг, которые быстро реорганизуются в соответствии с новыми вызовами. Примерами здесь могут быть сообщества на основе технологий блокчейн, технологии искусственного и гибридного интеллекта, деятельность которых сфокусирована на росте и усилении устойчивости БОС к вызовам, обусловленным факторами глобальной турбулентности.

Режим сценарной гибридизации (превентивный) предусматривает адаптацию сообществ путем моделирования сценариев и стратегий, а также гибридизации сценариев и стратегий, используемых заранее. В данном режиме адаптация носит превентивный характер: комбинирует культуры управления, технологии и экономики через симуляции с помощью агентного моделирования. Примером являются «умные экосистемы», например NEOM в Саудовской Аравии. Футуристический проект осуществляется с 2017 г. под председательством саудовского наследного принца Мухаммеда бин Салмана на принципах аркологии – архитектурно-градостроительной концепции возведения компактных городов и размещения множества людей на ограниченной территории, расположенной на крайнем северо-западе Саудовской Аравии в административном округе Табук на общей площади в 26 500 км². Его стоимость составляет 500 млрд долл. США².

Режим дезорганизации и саморазрушения (эсхатологический) предусматривает критические сбои, включая потерю целостности и доминирование энтропии. В этом режиме самоорганизация БОС переходит в хаос, структура системы становится жесткой, что исключает адаптивную реорганизацию. Примером является коллапс сетей криптовалютной биржи FTX из-за каскадных ошибок доверия на Багамах в ноябре 2022 г. Крах FTX, вызванный резким выводом средств клиентами, послужил толчком к ее банкротству. До своего краха FTX была третьей по величине криптовалютной биржей по объему

²Saudi Arabia Just Announced Plans to Build a Mega City That Will Cost \$500 Billion. – URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-24/saudi-arabia-to-build-new-mega-city-on-country-s-north-coast> (date of access: 30.04.2026).

и насчитывала более миллиона пользователей. При этом «умное сообщество» дезорганизуется, если не активировать ранние режимы.

«Умное сообщество» может использовать факторы глобальной турбулентности как драйвер для качественного изменения своей структуры. Происходит реконфигурация смыслов и ролей. «Умное сообщество» использует кризис для реорганизации своих компетенций, внедрения новых инструментов (ИИ, блокчейн) и расширения границ своего влияния. Для БОС, управляемых такими «умными сообществами», характерна стратегическая реструктуризация с переходом от вертикальных иерархий к сетевым или «экосистемным» моделям, причем инвестиции в инновации являются всего лишь способом изменения рыночной или социальной позиции «умного сообщества». Необходимо отметить, что жизнедеятельность «умных сообществ» как нуклеарных когнитивно-социальных структур БОС в условиях цифровой трансформации возможна лишь на основе высокой степени автоматизации процессов превентивного (а далее – преземптивного) управления рисками функционирования БОС в диалоговом режиме. При этом человек управляет решением задачи, изменяя ее условия и (или) порядок функционирования системы на основе оценки информации, предоставляемой ему техническими сенсорными устройствами и средствами отображения информации [18]. Как известно, объект гарантированно может достигнуть своих целей, только если он управляем, а приложенное к нему управление принадлежит к классу видов управлений с отрицательными обратными связями [20].

7. Практические кейсы стохастических моделей управления «умными сообществами» и БОС

«Умные сообщества» как нуклеарные когнитивно-социальные структуры БОС способны к самоорганизации, рефлексивному управлению и адаптивной реконфигурации в условиях воздействия внешних шоков, внутренних противоречий и факторов глобальной турбулентности. В организации «умными сообществами» БОС в различных сферах социальной практики используются как формальные, так и неформальные методы, позволяющие осуществлять превентивное управление их жизнедеятельностью, предупреждая отдельные негативные изменения, обусловленные вызовами, угрозами и рисками, которые в настоящее время неочевидны.

В сфере производства БОС – это интегрированный организационно-технологический комплекс с цепочками создания стоимости от добычи ресурсов до конечного продукта, включающий производственные мощности, логистические узлы, технологические платформы и человеческий капитал, которые организованы в единую систему с управляемыми потоками материи, энергии, информации и финансов.

В сфере услуг БОС – это динамическая сервисная экосистема, генерирующая нематериальную ценность через многомерные взаимодействия провайдеров и потребителей с цифровыми платформами, институциональными нормами и поведенческими алгоритмами. Она характеризуется высокой гетерогенностью клиентских запросов, персонализацией сервисных траекторий и непрерывной коэволюцией со средой потребления.

В сфере бизнеса БОС – это стратегически ориентированная ценностно-генерирующая конфигурация, интегрирующая финансовый капитал, интеллектуальные активы,

операционные процессы, рыночные позиции и партнерские сети в единую систему извлечения и распределения экономической стоимости. Она функционирует в условиях конкурентной среды, регуляторного давления и структурных трансформаций глобального рынка.

БОС, функционирующие в промышленности, логистике, образовании, здравоохранении, являются управляемыми на стратегическом, тактическом, операционном уровнях благодаря наличию нуклеарных социально-когнитивных структур – «умных сообществ».

Ниже приведены практические кейсы превентивного управления рисками инцидентов в «умных сообществах» БОС различной природы.

Кейс для организационно-технических систем. Рассмотрим цепочку поставок промышленного предприятия, включающую поставщиков, транспортные узлы, складскую инфраструктуру и производственные линии. В такой системе риск критического сбоя часто формируется не из-за одного крупного инцидента, а вследствие накопления случайных задержек, колебаний запасов, локальных отказов и сбоев синхронизации. Пусть $X(t)$ описывает вектор уровней запасов ресурсов, загрузки оборудования и времени выполнения операций, а скрытый риск $Z(t)$ отражает степень приближения к каскадному разрыву цепочек логистических поставок или функционирования производственного предприятия конвейерной организации.

Модель скрытого риска (напряжения) в «умном сообществе» БОС на основе интеграла Винера [14] позволяет учесть микровозмущения, возникающие в логистической среде:

$$dZ(t) = \mu_Z(Z(t), X(t), t)dt + \sigma_Z(Z(t), X(t), t)dW(t), \quad (30)$$

где μ_Z и σ_Z – функции от $Z(t)$, $X(t)$ и t .

Численные значения $Z(t)$, $X(t)$, μ_Z , σ_Z , а также $W(t)$ для (38) можно рассчитать с помощью ресурсов баз данных ООН (<https://www.un.org/ru/library/page/databases>), Всемирного банка (<https://data.worldbank.org/>), ВОЗ (<https://gateway.euro.who.int/ru/datasets/>), Eurostat (<https://ec.europa.eu/eurostat/data>) и Our World in Data (<https://ourworldindata.org/>). Эти ресурсы могут являться источниками адекватных данных для численного моделирования на основе теоретических положений, предложенных в данной работе.

Решение задачи анализа приближения к каскадному разрыву логистических или производственных процессов возможно, в частности, с помощью приближенных методов моделирования и оптимизации управления на основе среднеквадратических аппроксимаций. Предположим, что в ходе численного эксперимента применение модели (30) позволило получить результаты, представленные в таблице.

При росте дисперсии $Z(t)$ и вероятности достижения критического уровня автоматически активируются превентивные меры: перераспределение запасов, изменение маршрутов, резервирование производственных мощностей, перенос графиков поставок. По сравнению с традиционными пороговыми системами мониторинга данный подход позволяет выявлять формирование сбоя до наступления фактического дефицита.

Даже при умеренном росте стоимости превентивных действий достигается существенное снижение общего ущерба и частоты критических событий.

Результаты численного эксперимента на основе модели (30)

Results of a numerical experiment based on the model (30)

Показатель <i>Indicator</i>	Традиционный подход <i>Traditional approach</i>	Модель на основе интеграла Винера <i>Model based on the Wiener integral</i>
Точность раннего обнаружения	0,61±0,08	0,84±0,11
Среднее время упреждения	1,8 сут	4,9 сут
Вероятность каскадного сбоя	0,27±0,03	0,11±0,01
Дополнительные затраты на превентивные меры	1,00	1,14
Совокупный ожидаемый ущерб	1,00	0,63

Кейс для социальных систем. В социальных системах превентивное управление особенно важно при анализе конфликтной динамики, миграционных кризисов и массовых поведенческих реакций. Пусть $X(t)$ включает показатели занятости, уровня доверия, информационной поляризации, интенсивности протестных сообщений и пространственной мобильности. Скрытая переменная $Z(t)$ интерпретируется как «социальное напряжение». Принимая во внимание (30), эволюция скрытого риска (напряжения) в БОС может быть описана стохастическим уравнением с нелинейным дрейфом:

$$dZ(t) = (a_0 + a_1 Z(t) + a_2 Z^2(t) + a_3 X(t))\sigma(Z(t), X(t), t)dW(t), \quad (31)$$

где $\sigma(Z(t), X(t), t)$ – функция от $Z(t)$, $X(t)$ и t ;

a_0, a_1, a_2, a_3 – постоянные.

Численные значения $X(t)$, a_0, a_1, a_2, a_3 и σ в (31) могут быть получены на основе анализа вариационных рядов данных, описывающих динамику исследуемой социальной системы за определенный период времени.

Нелинейный компонент отражает эффект самоподдерживающейся эскалации. Винеровская составляющая описывает случайные информационные импульсы, локальные инциденты и поведенческие флуктуации в БОС. Превентивное управление здесь может включать адресные коммуникационные интервенции, перераспределение ресурсов социальной поддержки, временные институциональные меры снижения напряженности в состоянии системы. Модель позволяет определять не только текущий уровень напряженности в состоянии системы, но и вероятность ее перехода к фазе дезорганизации и разрушения на краткосрочном горизонте. В сравнении с ретроспективным анализом событий использование траекторных винеровских индикаторов дает возможность обнаруживать латентное приближение кризиса на более раннем этапе, особенно когда открытых симптомов еще недостаточно.

Кейс для социально-экономических систем. Для социально-экономических систем рассмотрим задачу превентивного управления финансовой нестабильностью на уровне макроэкономического контура. Пусть $X(t)$ включает инфляцию, ключевую ставку, кре-

дитный разрыв, валютную волатильность, уровень просроченной задолженности и индекс деловой уверенности. Скрытый риск $Z(t)$ можно трактовать как интегральный индекс системной финансовой уязвимости. Как следует из [14] и на основе (30) и (31), стохастическая динамика социально-экономических систем может быть представлена уравнением вида

$$\frac{dX(t)}{d\omega(t)} = A(X(t), u(t), t) + \frac{1}{d\omega(t)} B(X(t), u(t), t), \quad (32)$$

где управление $u(t)$ включает инструменты денежно-кредитной, макропруденциальной и бюджетной политики; $\omega(t)$ – винеровский процесс на интервале $[0, T]$.

После простых преобразований и интегрирования (32) можно получить выражение, которое соответствует стохастическому интегралу Винера [14]:

$$X(t) = \int_0^t A(X(t), u(t), t) d\omega(t) + \int_0^t B(X(t), u(t), t). \quad (33)$$

Использование стохастического интеграла Винера (33) позволяет моделировать накопление малых рыночных шоков, информационных импульсов и внешних турбулентных воздействий. В ходе сценарного анализа может быть выявлено, что раннее введение мягких ограничений на стадии роста стохастической волатильности эффективнее, чем жесткое вмешательство после наступления кризиса ликвидности. Это согласуется с концепцией превентивного управления как управления вероятностной траекторией, а не только реализованным ущербом при нарастании глобальной турбулентности.

Кейс для логистических систем. Глобальные цепочки поставок представляют собой сложные сети с высокой степенью взаимозависимости, уязвимые к каскадным сбоям. Так, пандемия 2020–2021 гг. и геополитические шоки 2022–2024 гг. продемонстрировали достаточно высокую неустойчивость логистических систем. Как следует из работ [17, 19], вектор состояния логистической БОС можно задать уравнением

$$X_t = (I_t, D_t, L_t, C_t)^T, \quad (34)$$

где I_t – уровень запасов;

D_t – волатильность спроса на рынках;

L_t – надежность логистики;

C_t – индекс кредитного риска поставщиков.

Динамика логистической БОС может быть описана системой дифференциальных уравнений на основе (30) и (34).

Здесь учтена известная положительная корреляция между показателями волатильности спроса и надежностью логистики в условиях организационного стресса и социально-экономической турбулентности.

По предварительным оценкам авторов, предложенный подход позволяет предсказывать три из четырех критических сбоев в логистических системах поставок за семь

дней до события, тогда как традиционный метод, основанный на использовании контрольных карт, показывает результат ноль из четырех попыток. Например, в случае прогнозирования вероятности сбоев поставок в деятельности мультитоварного производственного холдинга, если в распоряжении имеются временные ряды данных о поставках, запасах и финансовом состоянии 47 поставщиков крупного производственного холдинга за 2019–2024 гг. (ежедневная частота, 1305 наблюдений), то предложенная модель может обеспечить среднее время опережения наступления события ($Lead\ Time = 14,7$ дней против 2,3 дня при традиционном VaR-подходе), снижение вероятности критических сбоев поставок на 37 %, а также сокращение страховых запасов более чем на 20 % при сохранении требуемого уровня надежности прогноза.

Заключение

Разработаны основы подхода к превентивному управлению рисками инцидентов в «умных сообществах» как в нуклеарных структурах БОС на основе интеграла Винера и винеровской энтропии. Охарактеризованы режимы функционирования «умных сообществ» и представлены практические кейсы стохастических моделей управления «умными сообществами» в БОС в условиях глобальной турбулентности. В рамках предложенного подхода разработаны основные положения для математического моделирования (1)–(41) с целью обеспечения превентивного управления рисками проблемных ситуаций и опасных инцидентов в «умных сообществах» БОС на основе интеграла Винера. В частности, это модели идентификации и оценки рисков на основе интеграла Винера, модель раннего обнаружения и прогнозирования, оптимизации стратегий превентивного управления рисками.

Винеровская энтропия является мерой функционала, связывающего стохастическую динамику с интегральными характеристиками неопределенности траекторий состояний «умных сообществ» в условиях воздействия факторов возрастающей системной турбулентности. Такая мера интерпретируется через изменение мер вероятности на пространстве траекторий рисков инцидентов в «умных сообществах», составляющих основу БОС. Она количественно интерпретируется стохастическими интегралами Винера, обеспечивает основу для индикаторов раннего предупреждения и для энтропийно-регулируемого синтеза управления рисками развития проблемных ситуаций в БОС. Для решения подобных задач требуются модели процессов со скачками и разрывами, фрактальные шумы или гибридные режимно-переключающиеся модели. Поэтому перспективным направлением является развитие гибридных моделей, сочетающих интеграл Винера и винеровскую энтропию с машинным обучением, байесовской адаптацией, агент-ориентированным моделированием и теориями сетевой устойчивости.

Эти положения служат основаниями для научно-методического обеспечения и аппаратно-программной реализации интеллектуальной аналитической системы «Синтез и исследование рисков инцидентов в «умных сообществах» (ИАС «СИРИУС») для превентивного управления рисками инцидентов в основных сферах жизнедеятельности (образовании, здравоохранении, социальном обеспечении, инклюзивной деятельности, логистике, медиасфере, информационной, социальной и экологической безопасности). Реализация ИАС «СИРИУС» позволит преодолеть противоречия в сфере управления «ум-

ными сообществами», «умными городами», «умными урбанизированными экосистемами» и «умными регионами» с помощью методов стохастического моделирования и оптимизации. Важнейшей частью ИАС «СИРИУС» будут базы данных состояния «умных сообществ».

Принципиальная научная и практическая новизна ИАС «СИРИУС» заключается в системной разработке и исследовании кейсов и сценариев развития инцидентов, моделей и алгоритмов прогнозирования и превентивного управления рисками развития инцидентов в основных сферах жизнедеятельности «умных сообществ» с использованием моделей и методов стохастического управления рисками инцидентов в «умных сообществах» в условиях возможных вызовов ближайшего будущего.

Вклад авторов. *А. Г. Давыдовский* предложил идею и математический аппарат для превентивного управления рисками в «умных сообществах» на основе стохастического моделирования, *С. В. Кругликов* сформулировал цель и задачи исследования. Оба автора принимали участие в подготовке текста статьи, анализе и интерпретации результатов исследования.

Список использованных источников

1. Миланович, Б. Глобальное неравенство. Новый подход для эпохи глобализации / Б. Миланович ; пер. с англ. Д. Шестакова. – М. : Изд-во «Института Гайдара», 2017. – 336 с.
2. Motter, A. E. Cascade-based attacks on complex networks / A. E. Motter, Y.-C. Lai // *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. – 2002. – Vol. 66, no. 6, pt. 2. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>.
3. Медоуз, Д. Х. Пределы роста: 30 лет спустя / Д. Х. Медоуз, И. Рандерс, Д. Л. Медоуз ; пер. с англ. Е. С. Оганесян ; под ред. Н. П. Тарасовой. – М. : Бином, 2012. – 358 с.
4. Демиденко, Э. С. Буржуазно-техногенное уничтожение биосферной жизни и земного шара: междисциплинарное исследование / Э. С. Демиденко, Е. А. Дергачева. – М. : Ленанд, 2023. – 276 с.
5. Воронов, М. В. Биоинспирированный сценарный анализ связи эпидемии COVID-19 и технологий дистанционного обучения / М. В. Воронов, А. Г. Давыдовский // *Моделирование и анализ данных*. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 25–35. – <https://doi.org/10.17759/mda.2022120402>.
6. Climate tipping points – too risky to bet against / T. M. Lenton, J. Rockström, O. Gaffney [et al.] // *Nature*. – 2019. – Vol. 575, no. 7784. – P. 592–595. – <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>.
7. Social media analysis during political turbulence / D. Antonakaki, D. Spiliotopoulos, C. Samaras [et al.] // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 31, no. 12 (10). – URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0186836> (date of access: 30.04.2026). – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186836>.
8. Шваб, К. Технологии Четвертой промышленной революции : пер. с англ. / К. Шваб, Н. Дэвис. – М. : Эксмо, 2018. – 320 с.
9. Brisini, K. S. Relational turbulence and social network engagement during the summer of COVID-19: A repeated measures, dyadic analysis / K. S. Brisini, D. H. Solomon // *Journal of Social and Personal Relationships*. – 2022. – Vol. 39, no. 8. – P. 2435–2453. – <https://doi.org/10.1177/02654075221080760>.
10. Назаретян, А. П. Антропология насилия и культура самоорганизации: очерки по эволюционно-исторической психологии / А. П. Назаретян. – М. : ЛКИ, 2007. – 256 с.
11. Helbing, D. Globally networked risks and how to respond / D. Helbing // *Nature*. – 2013. – Vol. 497. – P. 51–59. – <https://doi.org/10.1038/nature12047>.

12. Человечество в новой реальности: глобальные биотехнологические вызовы / отв. ред. Г. Л. Белкина, ред.-сост. М. И. Фролова. – М. : Канон-Плюс, 2022. – 496 с.
13. Кругликов, С. В. Моделирование рисков развития «умного города» как сложной социотехнической системы / С. В. Кругликов, А. Г. Давыдовский // Информатика. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 7–32. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-2-7-32>.
14. Винер, Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов : пер. с англ. / Н. Винер. – М., 2025. – 158 с.
15. Давыдовский, А. Г. Моделирование процессов информационного обмена для синтеза бизнес-эталонной модели исполнительного комитета города (региона) / А. Г. Давыдовский, С. В. Кругликов // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2023) : докл. XXII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16 нояб. 2023 г. – Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2023. – С. 74–81.
16. Давыдовский, А. Г. Проблема прогнозирования цифровой трансформации предприятий и организаций / А. Г. Давыдовский // Системное моделирование социально-экономических процессов : тр. 46-й Междунар. науч. школы-семинара, Уфа, 9–15 окт. 2023 г. / под ред. И. Н. Щепиной. – Воронеж : Истоки, 2024. – С. 315–320.
17. Кащенко, С. А. Динамика моделей на основе логистического уравнения с запаздыванием / С. А. Кащенко. – М. : КРАСАНД, 2020. – 576 с.
18. Анцев, Г. В. Безопасность искусственных систем: управление безопасностью и рисками. Тезаурус : справ. изд. / Г. В. Анцев, В. П. Гаенко. – М. : Радиотехника, 2022. – 680 с.
19. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1977. – 831 с.
20. Дьячко, А. Г. Математическое и имитационное моделирование производственных систем : науч. изд. / А. Г. Дьячко. – М. : МИСИС, 2007. – 540 с.

References

1. Milanovic B. *Global Inequality: A New Approach for the Age of Globalization*. Belknap Press, An Imprint of Harvard University Press, 2016, 320 p.
2. Motter A. E., Lai Y.-C. Cascade-based attacks on complex networks. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2002, vol. 66, no. 6, pt. 2. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>.
3. Meadows D. H., Randers J., Meadows D. L. *The Limits to Growth: The 30-year Update*. Earthscan, 2004, 362 p.
4. Demidenko E. S., Dergacheva E. A. Burzhuazno-tehnogennoe unichtozhenie biosfernoj zhizni i zemnogo shara: mezhdisciplinarnoe issledovanie. *Bourgeois-man-made Destruction of Biospheric Life and the Globe: An Interdisciplinary Study*. Moscow, 2023. 276 p. (In Russ.)
5. Voronov M. V., Davydovsky A. G. *Bioinspired scenario analysis of the relationship between the COVID-19 epidemic and distance learning technologies*. Modelirovanie i analiz dannyh [Data Modeling and Analysis], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 25–35. <https://doi.org/10.17759/mda.2022120402> (In Russ.).
6. Lenton T. M., Rockström J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., ..., Schellnhuber H. J. Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature*, 2019, vol. 575, no. 7784, pp. 592–595. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>.

7. Antonakaki D., Spiliotopoulos D., Samaras C., Pratikakis P., Ioannidis S., Fragopoulou P. Social media analysis during political turbulence. *PLoS One*, 2017, vol. 31, no. 12 (10). Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0186836> (accessed 30.04.2026). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186836>.
8. Schwab K., Davis N. *Shaping the Future of the Fourth Industrial Revolution*. Penguin group, 2018, 288 p.
9. Brisini K. S., Solomon D. H. Relational turbulence and social network engagement during the summer of COVID-19: A repeated measures, dyadic analysis. *Journal of Social and Personal Relationships*, 2022, vol. 39, no. 8, pp. 2435–2453. <https://doi.org/10.1177/02654075221080760>.
10. Nazaretyan A. P. Antropologija nasilija i kul'tura samoorganizacii: ocherki po jevoljucionno-istoricheskoy psihologii. *Anthropology of Violence and Culture of Self-organization: Essays on Evolutionary and Historical Psychology*. Moscow, LKI, 2007, 256 p. (In Russ.).
11. Helbing D. Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 2013, vol. 497, pp. 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature12047>.
12. Belkin G. L., Frolov M. I. (eds.). *Humanity in the New Reality: Global Biotechnological Challenges*. Moscow, Canon-Plus, 2022, 496 p. (In Russ.).
13. Kruglikov S. V., Davidovsky A. G. *Modelling the risks of "smart city" development as a complex sociotechnical system*. *Informatika [Informatics]*, 2025, vol. 22, no. 2, pp. 7–32 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-2-7-32>.
14. Wiener N. *Nonlinear Problems in Random Theory*. Literary Licensing, LLC, 2013, 140 p.
15. Davidovsky A. G., Kruglikov S. V. *Modeling information exchange processes for synthesizing a business reference model of the executive committee of a city (region)*. *Razvitie informatizacii i gosudarstvennoj sistemy nauchno-tehnicheskoy informacii (RINTI-2023): doklady XXII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, Minsk, 16 nojabrja 2023 g. [*Development of Informatization and the State System of Scientific and Technical Information (RINTI-2023): Reports of the XXII International Scientific and Technical Conference, Minsk, 16 November 2023*]. Minsk, Ob'edinennyj institut problem informatiki Nacional'noj akademii nauk Belarusi, 2023, pp. 74–81 (In Russ.).
16. Davidovsky A. G. *The problem of forecasting the digital transformation of enterprises and organizations*. *Sistemnoe modelirovanie social'no-jekonomicheskikh processov: trudy 46-j Mezhdunarodnoj nauchnoj shkoly-seminara*, Ufa, 9–15 oktjabrja 2023 g. [*System Modeling of Socio-economic Processes: Proceedings of the 46th International Scientific School-seminar, Ufa, 9–15 October 2023*]. In I. N. Shchepina (ed.). Voronezh, Istoki, 2024, pp. 315–320 (In Russ.).
17. Kashchenko S. A. *Dinamika modelei na osnove logisticheskogo uravneniya s zapazdyvaniem. Dynamics of Models Based on the Logistic Equation with Delay*. Moscow, KRASAND, 2020, 576 p. (In Russ.).
18. Antsev G. V., Gayenko V. P. *Bezopasnost' iskusstvennyh sistem: upravlenie bezopasnost'ju i riskami. Tezaurus. Safety of Artificial Systems: Safety and Risk Management. Thesaurus*. Moscow, Radiotekhnika, 2022, 680 p. (In Russ.).
19. Korn G., Korn T. *Sprovochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inschenerov. Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers*. Moscow, Nauka, 1977, 831 p. (In Russ.).
20. Dyachko A. G. *Matematicheskoe i imitacionnoe modelirovanie proizvodstvennyh sistem. Mathematical and Simulation Modeling of Production Systems*. Moscow, MISIS, 2007, 540 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Давыдовский Анатолий Григорьевич, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры микропроцессорных систем и сетей Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
E-mail: agd2011@list.ru

Кругликов Сергей Владимирович, доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Information about the authors

Anatoly G. Davidovsky, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Microprocessor Systems and Networks of the Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: agd2011@list.ru

Sergey V. Kruglikov, Dr. Sci. (Milit.), Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Chief Scientific Officer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

УДК 004.89

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-68-79>

Поступила в редакцию | Received 10.03.2026

Подписана в печать | Accepted 06.04.2026

Опубликована | Published 30.06.2026

Разработка интеллектуальной системы планирования на основе персонального ассистента

А. В. Яскевич, В. А. Чуйко[✉][✉]E-mail: Vchuyko@bsu.by

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

Аннотация

Цели. Целью исследования является разработка интеллектуальной системы планирования, функционирующей локально на оборудовании пользователя без передачи данных в Интернет.

Методы. Рассматривается проблема обеспечения конфиденциальности и автономности цифровых ассистентов, зависящих от облачной инфраструктуры. Предложена клиент-серверная архитектура, в которой серверная часть реализована с использованием фреймворка FastAPI и базы данных SQLite, а клиентский интерфейс разработан на языке JavaScript. Визуализация расписания и редактирование записей осуществляются через веб-интерфейс.

Результаты. Описан голосовой конвейер системы: для активации используется движок Porcupine, для транскрибации – модель Faster-Whisper с квантованием int8. Проведен сравнительный анализ технологического стека, обеспечивающего высокую точность распознавания речи. Разработан гибридный модуль понимания естественного языка. Реализована технология RAG, интегрирующая данные расписания в контекст генерации ответа. Для синтеза речи используется нейросеть Piper, выполнение которой через ONNX Runtime обеспечивает высокую скорость обработки. Разработан эвристический алгоритм жадного поиска для управления временными ресурсами.

Заключение. Сделан вывод о применимости разработанной системы в корпоративном секторе, где критически важны защита информации и функционирование в условиях закрытого сетевого контура.

Ключевые слова: интеллектуальная система, голосовой ассистент, нейронные сети, планирование задач, распознавание речи, естественный язык, графическая оболочка

Для цитирования. Яскевич, А. В. Разработка интеллектуальной системы планирования на основе персонального ассистента / А. В. Яскевич, В. А. Чуйко // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 68–79. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-68-79>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Development of an intelligent scheduling system based on a personal assistant

Anton V. Yaskевич, Vladislav A. Chuyko✉

✉E-mail: Vchuyko@bsu.by

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

Abstract

Objectives. The aim of the research is to develop an intelligent scheduling system operating locally on the user's equipment without data transmission via Internet.

Methods. This paper examines the problem of ensuring the privacy and autonomy of digital assistants dependent on cloud infrastructure. A client-server architecture is proposed, in which the server component is implemented using the FastAPI framework and an SQLite database, and the client interface is written in JavaScript. Schedule visualization and entry editing are performed through the web interface.

Results. The system's voice pipeline is described: the Porcupine engine is used for activation, and the Faster-Whisper model with int8 quantization is used for transcription. A comparative analysis of the technology stack, ensuring high speech recognition accuracy, is conducted. A hybrid natural language understanding module is developed. RAG technology is implemented, integrating schedule data into the response generation context. Speech synthesis is performed using the Piper neural network, whose execution through ONNX Runtime ensures high processing speed. A heuristic greedy search algorithm for managing time resources has been developed.

Conclusion. The developed system is considered applicable in the corporate sector, where information security and operation in closed network environments are critical.

Keywords: intelligent system, voice assistant, neural networks, task planning, speech recognition, natural language, graphical shell

For citation. Yaskевич A. V., Chuyko V. A. *Development of an intelligent scheduling system based on a personal assistant*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 2, pp. 68–79 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-68-79>.

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

Введение

Сегодня развитие информационных технологий направлено на автоматизацию рутинных процессов и повышение личной эффективности пользователя за счет предоставления инструментов, способных оптимизировать временные затраты и снизить когнитивную нагрузку. Одним из способов автоматизации рутинных процессов является использование интеллектуальных систем, представленных в виде персональных ассистентов, позволяющих решать задачи управления личным временем пользователя. Существующие коммерческие решения, такие как Google Assistant и Amazon Alexa, демонстрируют высокую эффективность в различных сферах деятельности человека: организации рабочего процесса, управлении умным домом, поиске и структурировании информации. Существенным ограничением подобных платформ остаются зависимость от облачной инфраструктуры и необходимость передачи пользовательских данных на удаленные серверы, что создает риски для конфиденциальности и безопасности персональной

информации. Возможным решением данной проблемы является разработка интеллектуальных систем, объединяющих голосовое управление и алгоритмическое планирование без обращения к облачным сервисам, что позволяет обеспечить приватность, автономность и безопасность цифровых персональных ассистентов.

Разработка интеллектуальной системы

Проектирование голосового интерфейса требует решения ряда задач, связанных с обработкой естественного языка и обеспечением высокой скорости отклика системы. Основным сценарием использования голосового ассистента является бесконтактное взаимодействие, позволяющее пользователю управлять расписанием встреч и мероприятий без отрыва от текущей деятельности.

Одним из ключевых требований при разработке голосового ассистента является обеспечение непрерывного фоновое прослушивания для детекции ключевой фразы активации. Данный процесс должен осуществляться с минимальным энергопотреблением, исключать ложные срабатывания, а также обеспечивать функционирование системы на стандартном компьютерном оборудовании без необходимости использования специализированных серверных ускорителей.

Особенностью разрабатываемой системы является внедрение механизма автоматизации интеграции гибких задач в расписание. Планирование рабочего времени основывается на разделении задач на две категории. К первой категории относятся события (встречи, поездки), имеющие фиксированное время начала и окончания, ко второй категории – гибкие задачи, обладающие определенной длительностью и сроком выполнения, но не привязанные к конкретному моменту времени.

При разработке диалоговых систем выделяют три основных подхода к организации вычислений: облачный, локальный и гибридный. В рамках данной работы используется локальный подход.

Разработанная интеллектуальная система предназначена для планирования личного времени на базе персонального голосового ассистента. В основе системы лежит клиент-серверная архитектура, адаптированная для локального использования на оборудовании пользователя. Схема информационных потоков и взаимодействия компонентов изображена на рис. 1.

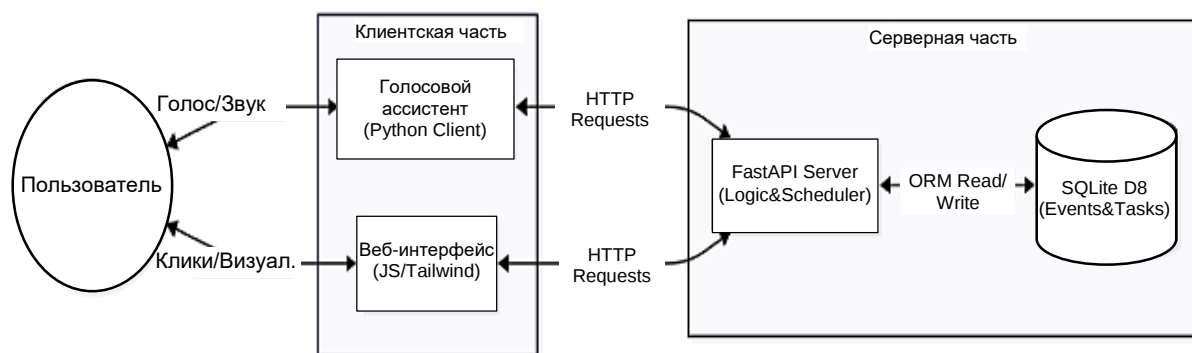


Рис. 1. Схема потоков данных между интерфейсами ввода и серверной частью

Fig. 1. Data flow diagram between input interfaces and the server part

Клиентская часть объединяет два программных модуля, отправляющих запросы на сервер. Первый модуль – голосовой ассистент, написанный на языке Python. Компонент отвечает за работу с микрофоном и динамиками, преобразуя речь в команды. Второй модуль – веб-интерфейс, созданный на базе языка JavaScript и фреймворка Tailwind CSS. Рассматриваемые инструменты служат для визуального отображения календаря и позволяют пользователю вручную редактировать записи, внесенные голосовым ассистентом. Несмотря на разные способы ввода, оба приложения работают по единому принципу: действия пользователя превращаются в стандартные HTTP-запросы и передаются на сервер.

Серверная часть отвечает за вычисления и хранение информации. Главным узлом обработки является фреймворк FastAPI. Компонент принимает входящие запросы от клиентов, проверяет корректность данных и запускает логику работы, включая алгоритмы планирования. Для хранения данных используется база данных SQLite. В ней содержатся таблицы для двух типов записей: фиксированных «Событий» и гибких «Задач». Связь между сервером и базой данных организована через механизм ORM. Сервер выполняет операции чтения и записи, работая с данными как с обычными программными объектами, без написания сложных SQL-команд.

Использование голосового интерфейса позволяет управлять ассистентом бесконтактно (голосом пользователя), не отрываясь от текущих задач. При этом локальное выполнение всей цепочки обработки – от детекции голоса до генерации ответа – решает задачу защиты персональной информации: аудиопоток и содержимое календаря не покидают устройство пользователя, что гарантирует приватность данных.

Голосовой конвейер на базе моделей Porcupine и Faster-Whisper

Преобразование акустического сигнала в текст является ресурсоемкой задачей, в связи с чем в разработанной системе реализован двухэтапный подход для минимизации нагрузки на центральный процессор и обеспечения высокой точности распознавания в условиях бытовых шумов [1–5]. Для реализации первого этапа – непрерывного мониторинга эфира и детекции ключевой фразы – используется движок Porcupine. Его выбор обоснован результатами сравнительного анализа с классическими решениями. В отличие от библиотек на базе скрытых марковских моделей, например CMU PocketSphinx, которые чувствительны к шумам и показывают частоту пропуска активации до 52 %, Porcupine базируется на глубоких нейронных сетях, обученных в режиме End-to-End. На рис. 2 продемонстрирована эффективность различных движков: сравнивается вероятность пропуска ключевой фразы (Wake Word Miss Rate) при фиксированном уровне чувствительности, допущение одного ложного срабатывания за 10 ч. Видно, что Porcupine демонстрирует наилучший результат с частотой пропуска всего 2,7 %. Для сравнения, классический PocketSphinx в тех же условиях пропускает более половины команд (52 %), а Snowboy – около трети (31,9 %). Это обосновывает выбор Porcupine как наиболее стабильного решения для зашумленной среды.

Помимо точности распознавания, рассмотренной выше, важным параметром для встраиваемых систем является вычислительная эффективность, которая напрямую влияет на энергопотребление устройства [6–9].

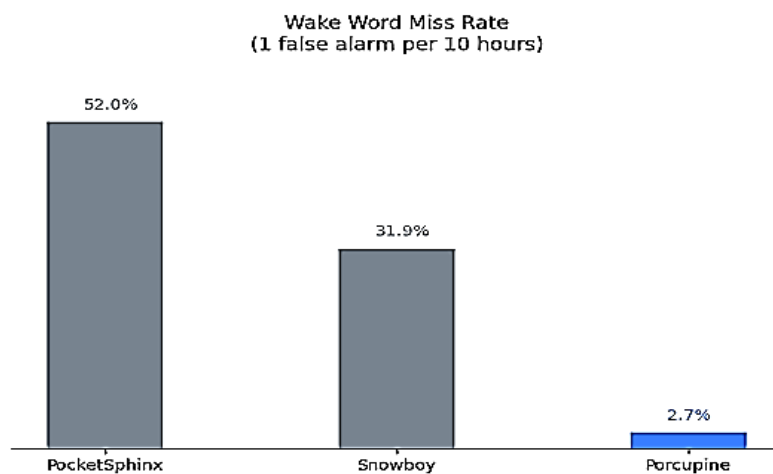


Рис. 2. Сравнительный график частоты пропуска активации при условии одного ложного срабатывания за 10 ч

Fig. 2. Comparative graph of the activation miss rate under the condition of one false alarm per 10 hours

Эксперименты по оцениванию производительности голосовых движков проводились на микрокомпьютере Raspberry Pi 5 под управлением 32-битной Raspberry Pi OS. Устройство оснащено процессором Broadcom BCM2712 (Quad-core ARM Cortex-A76, 2,4 ГГц).

На рис. 3 представлен сравнительный анализ нагрузки на центральный процессор при работе модулей детекции ключевой фразы в режиме непрерывного прослушивания. Тесты показали, что Porcupine является наиболее легковесным решением, потребляя менее 0,6 % ресурсов CPU. Это значительно эффективнее аналогов: Snowboy требует в шесть раз больше ресурсов (3,8 %), а PocketSphinx – более 12 %, что делает их менее пригодными для фоновой мониторинга эфира в автономном режиме.

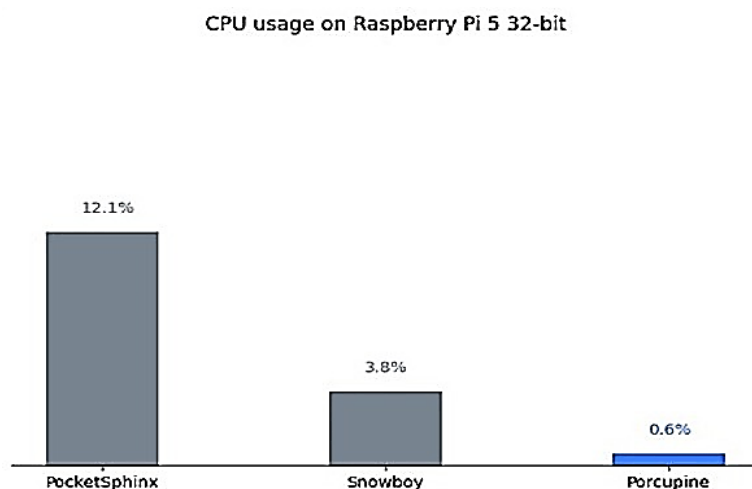


Рис. 3. График потребления ресурсов CPU на компьютере Raspberry Pi

Fig. 3. CPU resource consumption graph on a Raspberry Pi computer

Автоматическое распознавание речи

В качестве технологии выбрана модель Faster-Whisper с применением квантования весов до формата int8. Семейство моделей Vosk привязано к жесткому словарю и лишено механизма внимания, что приводит к высокому уровню ошибок (WER ~9,2–14,5 %). В то же время архитектура Transformer в Faster-Whisper позволяет эффективно использовать контекст фразы. Применение квантования CTranslate2 дает возможность сохранять точность транскрипции на уровне эталонных облачных сервисов (WER ~4,8 %), обеспечивая при этом высокую скорость обработки. Секунда речи обрабатывается за 0,5–0,6 с процессорного времени. Таким образом, сформированный стек технологий включает в себя:

Porcupine – для энергоэффективной активации по ключевому слову;

Faster-Whisper с квантованием int8 – для быстрого перевода речи в текст;

CTranslate2 – для оптимизации инференса модели на CPU.

Предложенная комбинация позволяет реализовывать полностью автономный и конфиденциальный голосовой интерфейс.

Обработка текстовых команд требует преобразования неструктурированной фразы в формализованный объект. Подход на базе регулярных выражений не использовался ввиду высокой вариативности естественного языка, а применение исключительно больших языковых моделей (Large Language Model, LLM) для каждого запроса требует высоких вычислительных затрат, что приводит к задержкам ответа системы. В разработанной системе реализован двухуровневый подход к анализу текста, позволяющий балансировать между скоростью и гибкостью.

На первом уровне в качестве основного компонента NLU-модуля используется модель BERT для первичной обработки запроса и классификации намерений. Ее применение обусловлено способностью преобразовывать запрос в векторное представление и соотносить с конкретными слотами (датой, временем, названием задачи) с высокой точностью [10–13]. Описанные возможности обеспечивают мгновенную реакцию системы на типовые команды управления календарем без привлечения тяжелых нейросетевых ресурсов.

Второй уровень активируется в тех случаях, когда запрос выходит за рамки стандартных сценариев или требует логического вывода. Для этого включается гибридный режим с привлечением LLM. По результатам сравнительного тестирования в качестве базовой модели выбрана Qwen 2.5-7B-Instruct. В отличие от моделей семейства Llama 3 и Mistral Qwen 2.5-7B-Instruct продемонстрировала высокую скорость генерации на центральном процессоре (8–10 токенов/с против трех-шести у аналогов) и более качественную поддержку русского языка.

Интеграция LLM реализована по методике RAG (Retrieval-Augmented Generation). Для обеспечения точности система в реальном времени формирует контекстное окно, выгружая из локальной базы данных SQLite актуальное расписание пользователя на ближайшие 48 ч. Данные внедряются в системный промпт, что позволяет модели выступать в роли интеллектуального консультанта: находить свободные окна, предлагать оптимальное время для переноса задач и отвечать на вопросы о занятости, сохраняя при этом полную конфиденциальность благодаря локальной реализации системы [14–16].

Эвристический алгоритм планирования

Для визуального управления расписанием разработан интерактивный веб-интерфейс в виде календаря (рис. 4), который служит средой для работы алгоритма автоматического планирования. Процесс автоматического распределения гибких задач описывается как последовательный рабочий цикл, объединяющий алгоритмические вычисления и пользовательский интерфейс. В основе этой функции лежит эвристический алгоритм жадного поиска.

	вс 14.12	пн 15.12	вт 16.12	ср 17.12
06				
07				
08				
09				
10			09:30-10:20 Обмен фотбаками с hr	
11				
12				
13				
14		14:00 - 16:00 Звонок с командой	14:00 - 16:00 Звонок с командой	14:00 - 15:00 Звонок с командой

Рис. 4. Главный экран веб-интерфейса с отображением событий и задач

Fig. 4. The main screen of the web interface displaying events and tasks

Для определения оптимального временного интервала каждый потенциальный слот ранжируется с помощью весовой функции оценки:

$$Score = w_1 + P_{time} + w_2 + C_{compact} - w_3 L_{gap},$$

где P_{time} – метрика близости к желаемому времени начала задачи; $C_{compact}$ – критерий компактности, поощряющий размещение задач вплотную к уже существующим; L_{gap} – штраф за создание окон с интервалом менее 15 мин, которые невозможно эффективно использовать; w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты, подобранные эмпирическим путем для баланса между пожеланиями пользователя и плотностью расписания.

Работа алгоритма начинается на этапе параметризации задачи, когда пользователь через графический интерфейс (рис. 5) задает название, длительность и уровень приоритета, при необходимости активируя опцию дробления задачи на части. После сохранения данные попадают в список ожидающих задач (рис. 6), где классифицируются как плавающие и ранжируются в очереди на основе вычислительного рейтинга приоритетности, учитывающего важность и близость дедлайна.

Рис. 5. Интерфейс создания гибкой задачи с параметрами для алгоритмического планирования

Fig. 5. Interface for creating a flexible task with parameters for algorithmic planning

Рис. 6. Панель навигации и управления очередью нераспределенных задач

Fig. 6. Navigation and control panel for the queue of unassigned tasks

Процесс планирования инициируется командой «Составить расписание», после чего алгоритм выявляет свободные временные интервалы в сетке календаря, не занятые фиксированными событиями. Для каждого найденного слота вычисляется итоговый вес, который визуализируется в интерфейсе в виде конкретного значения рейтинга (рис. 7).

Рис. 7. Панель управления предложениями планировщика и механизм подтверждения задач

Fig. 7. Planner suggestion control panel and task confirmation mechanism

Сформированные результаты не вносятся в график немедленно, а направляются в специализированную буферную зону – вкладку «Предложения». Здесь пользователь имеет возможность провести предварительный просмотр предложенного времени (например, четверг 12:05) и верифицировать решение алгоритма, нажав кнопки «Принять» или «Отклонить». Описанный механизм подтверждения гарантирует полный контроль пользователя над расписанием и исключает риск нежелательных автоматических изменений в структуре личного времени.

Синтез речи

Завершающим этапом коммуникационного цикла является подсистема синтеза речи, при проектировании которой решалась задача выбора баланса между естественностью звучания и скоростью работы на центральном процессоре [16–20]. Сравнительный анализ в таблице показывает, что стандартные системные решения работают быстро, но не обеспечивают должного качества голоса, в то время как тяжелые генеративные модели (Bark, Tortoise) создают паузы в диалоге из-за высокого показателя RTF.

Сравнительная характеристика технологий синтеза речи
Comparative characteristics of speech synthesis technologies

Решение <i>Solution</i>	Нагрузка на CPU <i>CPU load</i>	Скорость (RTF)* <i>Speed (RTF)*</i>
System (pyttsx3)	Минимальная	< 0,01
Bark / Tortoise	Экстремальная	> 2,5
Piper (VITS)	Средняя	0,05 – 0,1

В качестве компромисса выбран движок Piper на базе архитектуры VITS, объединяющей акустическую модель и вокодер в единую нейросеть. Использование среды исполнения ONNX Runtime и квантование моделей позволяют достичь показателя RTF на уровне 0,1, что означает генерацию 10-секундной фразы всего за 1 с. Такой подход минимизирует нагрузку на оперативную память и позволяет удерживать общую задержку системы в пределах комфортных для пользователя одной-двух секунд, обеспечивая высокую отзывчивость интерфейса в полностью автономном режиме.

Заключение

В результате выполнения работы спроектирована и программно реализована автономная система интеллектуального голосового управления. Тестирование подтвердило, что система работает корректно и успешно выполняет функции распознавания речи, планирование расписания, однако имеет некоторые недостатки:

1. *Производительность и ограничения.* Несмотря на оптимизацию стека (Porcupine + Faster-Whisper), анализ показал, что в моменты пиковой нагрузки (активация нейросетевых моделей) потребление ресурсов устройства существенно возрастает. При использовании на персональных компьютерах средней мощности фоновые процессы способны замедлять работу системы, создавая дискомфорт для пользователя и тем самым приводя к замедлению системы при режиме отзывчивости.

2. *Сравнение с облачными аналогами.* Для различных задач подходят разные сервисы: облачные сервисы остаются актуальным и удобным решением для частных пользователей, которые не предъявляют жестких требований к конфиденциальности и готовы доверять свои данные сторонним провайдерам ради экономии ресурсов ПК. Однако при работе с данными, запрещенными к распространению, лучшим решением являются локальные сервисы.

3. *Целевая сфера применения.* Разработанная система показала наибольшую эффективность как решение для корпоративного сектора. Архитектура проекта позволяет развернуть ассистента на выделенном мощном оборудовании внутри закрытого локального домена организации.

Разработанное решение обеспечивает интеллектуальное голосовое управление без передачи данных в Интернет, что гарантирует полную защиту корпоративной информации. Такой подход целесообразен для компаний, где политика безопасности запрещает использование облачных сервисов, а наличие серверных мощностей нивелирует проблему ресурсоемкости алгоритмов. В дальнейшем в работе планируется рассмотреть возможность замены жесткого алгоритма жадного поиска на более гибкие метаэвристические методы (например, генетические алгоритмы) или внедрить механизм адаптивной, а не эмпирической настройки весовых коэффициентов для функции оценки слота.

Вклад авторов. В. А. Чуйко разработал концепцию работы, провел ряд исследований, сделал критический анализ системы и текста статьи. А. В. Яскевич осуществил разработку системы, провел исследования и написал текст статьи.

Список использованных источников

1. Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision / A. Radford, J. W. Kim, T. Xu [et al.]. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2212.04356> (date of access: 13.01.2026).
2. Кузьменков, Л. П. Система транскрибации речи и перевода с русского языка на китайский / Л. П. Кузьменков, В. А. Чуйко, Е. И. Козлова // Информатика. – 2025. – Т. 22, № 3. – С. 25–34. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-3-25-34>.
3. Рыбина, Г. В. Основы построения интеллектуальных систем : учеб. пособие / Г. В. Рыбина. – М. : Финансы и статистика, 2010. – 432 с.
4. Куратов, Ю. М. Адаптация глубоких двунаправленных трансформеров-энкодеров для задач русского языка / Ю. М. Куратов, М. Ю. Архипов // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии : по материалам ежегодной Междунар. конф. «Диалог». – 2019. – № 18. – С. 333–339.
5. Зегжда, Д. П. Основы безопасности информационных систем / Д. П. Зегжда, А. М. Ивашко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2000. – 452 с.
6. Кипяткова, И. С. Аналитический обзор систем автоматического распознавания русской речи / И. С. Кипяткова, А. А. Карпов // Труды СПИИРАН. – 2013. – № 6 (29). – С. 5–20.
7. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // Proc. of the 2019 Conf. of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Minneapolis, MN, USA, 2–7 June 2019. – Minneapolis, 2019. – Vol. 1. – P. 4171–4186.
8. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks / P. Lewis, E. Perez, A. Piktus [et al.] // NIPS'20 : 34th Intern. Conf. on Neural Information Processing Systems, Vancouver, BC, Canada, 6–12 Dec. 2020. – Vancouver, 2020. – P. 9459–9474.

9. Бурцев, М. С. Разговорный интеллект: от тестов Тьюринга к глубокому обучению / М. С. Бурцев // Труды Московского физико-технического института. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 4–12.
10. Kim, J. Conditional variational autoencoder with adversarial learning for end-to-end text-to-speech / J. Kim, J. Kong, J. Son // Proc. of the 38th Intern. Conf. on Machine Learning, ICML 2021, Online, 18–24 July 2021. – 2021. – Vol. 139. – P. 5530–5540.
11. Qwen Technical Report / J. Bai, S. Bai, Y. Chu [et al.]. – 2023. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2309.16609> (date of access: 13.01.2026).
12. Efficient keyword spotting using dilated convolutions and gating / A. Coucke, M. Chlieh, T. Gisselbrecht [et al.] // IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2019, Brighton, United Kingdom, 12–17 May 2019. – Brighton, 2019. – P. 6351–6355.
13. Hoy, M. B. Alexa, Siri, Cortana, and more: An introduction to voice assistants / M. B. Hoy // Medical Reference Services Quarterly. – 2018. – Vol. 37, no. 1. – P. 81–88.
14. Privacy attitudes of smart speaker users / N. Malkin, J. Deatruck, A. Tong [et al.] // Proceedings on Privacy Enhancing Technologies. – 2019. – Vol. 2019, iss. 4. – P. 250–271.
15. Attention is all you need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar [et al.] // NIPS'17 : Proc. of the 31st Intern. Conf. on Neural Information Processing Systems, Long Beach, California, USA, 4–9 Dec. 2017. – Long Beach, 2017. – P. 6000–6010.
16. Лазарев, А. А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А. А. Лазарев, Е. Г. Мусатова. – М. : МГУ, 2012. – 208 с.
17. Edge intelligence: Paving the last mile of artificial intelligence with edge computing / Z. Zhou, X. Chen, E. Li [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2019. – Vol. 107, no. 8. – P. 1738–1762.
18. LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models / H. Touvron, T. Lavril, G. Izacard [et al.]. – 2023. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2302.13971> (date of access: 13.01.2026).
19. Щеглов, А. Ю. Защита информации: основы теории / А. Ю. Щеглов. – М. : Юрайт, 2019. – 309 с.
20. A Survey of Quantization Methods for Efficient Neural Network Inference / A. Gholami, S. Kim, Z. Dong [et al.]. – 2021. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2103.13630> (date of access: 13.01.2026).

References

1. Radford A., Kim J. W., Xu T., Brockman G., McLeavey C., Sutskever I. *Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision*, 2022. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2212.04356> (accessed 13.01.2026).
2. Kuzmenkov L. P., Chuyko V. A., Kazlova A. I. *Speech transcription and translation system from Russian to Chinese*. Informatika [Informatics], 2025, vol. 22, no. 3, pp. 25–34 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2025-22-3-25-34>.
3. Rybina G. V. *Osnovy postroeniya intellektual'nyh sistem. Fundamentals of Building Intelligent Systems*. Moscow, Finansy i statistika, 2010, 432 p. (In Russ.).
4. Kuratov Ju. M., Arhipov M. Ju. *Adaptation of deep bidirectional transformer-encoders for Russian language tasks*. Komp'yuternaja lingvistika i intellektual'nye tehnologii: po materialam ezhegodnoj Mezhdunarodnoj konferencii «Dialog» [Computational Linguistics and Intelligent Technologies: Based on the Materials of the Annual International Conference "Dialogue"], 2019, no. 18, pp. 333–339 (In Russ.).
5. Zegzhda D. P., Ivashko A. M. *Osnovy bezopasnosti informacionnyh sistem. Fundamentals of Information Systems Security*. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom, 2000, 452 p. (In Russ.).
6. Kipjatkova I. S., Karpov A. A. *Analytical review of automatic Russian speech recognition systems*. Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings], 2013, no. 6 (29), pp. 5–20 (In Russ.).
7. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association*

for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Minneapolis, MN, USA, 2–7 June 2019. Minneapolis, 2019, vol. 1, pp. 4171–4186.

8. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., ..., Kiela D. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *NIPS'20: 34th International Conference on Neural Information Processing Systems, Vancouver, BC, Canada, 6–12 December 2020*. Vancouver, 2020, pp. 9459–9474.

9. Burcev M. S. *Conversational intelligence: From turing tests to deep learning*. Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta [*Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*], 2022, vol. 14, no. 1, pp. 4–12 (In Russ.).

10. Kim J., Kong J., Son J. Conditional variational autoencoder with adversarial learning for end-to-end text-to-speech. *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning, ICML 2021, Online, 18–24 July 2021*. 2021, vol. 139, pp. 5530–5540.

11. Bai J., Bai S., Chu Y., Cui Z., Dang K., ..., Zhu T. *Qwen Technical Report*, 2023. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2309.16609> (accessed 13.01.2026).

12. Coucke A., Chlieh M., Gisselbrecht T., Leroy D., Poumeyrol M., Lavril T. Efficient keyword spotting using dilated convolutions and gating. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2019, Brighton, United Kingdom, 12–17 May 2019*. Brighton, 2019, pp. 6351–6355.

13. Hoy M. B. Alexa, Siri, Cortana, and more: An introduction to voice assistants. *Medical Reference Services Quarterly*, 2018, vol. 37, no. 1, pp. 81–88.

14. Malkin N., Deatrick J., Tong A., Wijesekera P., Egelman S., Wagner D. Privacy attitudes of smart speaker users. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*, 2019, vol. 2019, iss. 4, pp. 250–271.

15. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., ..., Polosukhin I. Attention is all you need. *NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach, California, USA, 4–9 December 2017*. Long Beach, 2017, pp. 6000–6010.

16. Lazarev A. A., Musatova E. G. *Teoriya raspisaniy. Zadachi i algoritmy. Scheduling Theory: Problems and Algorithms*. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M. V. Lomonosova, 2012, 208 p. (In Russ.).

17. Zhou Z., Chen X., Li E., Zeng L., Luo K., Zhang J. Edge intelligence: Paving the last mile of artificial intelligence with edge computing. *Proceedings of the IEEE*, 2019, vol. 107, no. 8, pp. 1738–1762.

18. Touvron H., Lavril T., Izacard G., Martinet X., Lachaux M.-A., ..., Lample G. *LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models*, 2023. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2302.13971> (accessed 13.01.2026).

19. Shheglov A. Ju. Zashhita informacii: osnovy teorii. *Information Security: Theoretical Basics*. Moscow, Jurajt, 2019, 309 p. (In Russ.).

20. Gholami A., Kim S., Dong Z., Yao Z., Mahoney M. W., Keutzer K. *A Survey of Quantization Methods for Efficient Neural Network Inference*, 2021. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2103.13630> (accessed 13.01.2026).

Информация об авторах

Яскевич Антон Викторович, студент, Белорусский государственный университет.
E-mail: Tosha.yaskevich@mail.ru

Чуйко Владислав Александрович, магистр физико-математических наук, старший преподаватель, Белорусский государственный университет.
E-mail: Vchuyko@bsu.by

Information about the authors

Anton V. Yaskevich, Student, Belarusian State University.
E-mail: Tosha.yaskevich@mail.ru

Vladislav A. Chuyko, M. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer, Belarusian State University.
E-mail: Vchuyko@bsu.by

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL MODELING

UDC 519.833, 519.863

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-80-93>

Received | Поступила в редакцию 01.04.2026

Accepted | Подписана в печать 07.05.2026

Published | Опубликовано 30.06.2026

Application of Tullock Contest Success Function to transaction fee optimization in high-throughput networks

Artyom G. BokunE-mail: a.bokun@bsuir.by*Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
st. P. Brovki, 6, Minsk, 220013, Belarus***Abstract**

Objectives. This paper investigates the feasibility of applying a Contest Success Function (CSF) to optimize priority fee expenditures in blockchain networks utilizing priority fee auctions. We analyze the model's ability to describe the relationship between "effort" (bid amount) and the probability of successful transaction inclusion.

Methods. We conducted an experiment to compare the efficiency of the canonical CSF model (Tullock contest strategy) against a baseline strategy – a simple average of the target percentile derived from historical data. Both strategies utilized context gathered from historical datasets to generate bid proposals for the subsequent block. Performance was evaluated based on two primary metrics: the average effort (mean bid size) and the success rate (the percentage of bids successfully landing within the target percentile). The experiment comprised a total of 632 rounds of bid generation.

Results. The experimental trials yielded performance metrics indicating that the canonical CSF model is well-suited for cost optimization in priority fee auctions. Specifically, strategies with decisiveness parameters $R = 10$ and $R = 20$ demonstrated the most favorable results. Furthermore, a positive correlation was observed between the decisiveness parameter R and the strategy's performance; a decrease in the value of R led to a corresponding decline in the strategy's efficiency for cost optimization.

Conclusion. The experimental results demonstrate the overall effectiveness of the canonical CSF for optimizing priority fee expenditures. This approach is particularly relevant for sectors with rapidly advancing blockchain integration, most notably financial services, investment management, and trading. However, it is worth noting that the proposed methodologies are agnostic to specific implementations or projects; they are applicable to any network that implements a transaction prioritization mechanism via additional fees. There remains significant scope for further research, including the introduction of novel performance metrics, the use of more specialized datasets, and the investigation of different historical context window sizes for the model.

Keywords: blockchain, Contest Success Function, Tullock model, percentile, game theory, non-cooperative game, auction, conflicts

For citation. Bokun A. G. *Application of Tullock Contest Success Function to transaction fee optimization in high-throughput networks*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 2, pp. 80–93 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-80-93>.

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

Применение функций успеха в соревновании для оптимизации транзакционных сборов в сетях с высокой пропускной способностью

А. Г. Бокун

E-mail: a.bokun@bsuir.by

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Аннотация

Цели. Целью работы является исследование возможности применения модели описания зависимости вероятности победы от приложенных усилий для оптимизации затрат на приоритетную отправку транзакций в сетях с аукционом приоритезирующих комиссий. Анализируется способность модели описывать взаимосвязь между некоторым «усилием» (в данном случае предложенной ценой) и вероятностью успешного включения транзакции в блок.

Методы. В рамках исследования был проведен эксперимент, где сравнивалась эффективность математической модели CSF (Contest Success Function, функция успеха в соревновании) в каноническом виде (модель Таллока) и конкурирующая стратегия – получение простого среднего по целевому процентилю на исторических данных. Для работы двух стратегий был собран контекст из исторических данных, на основании которого модели делали свои предложения ставок на следующий блок. Оценка была проведена по двум критериям: среднее значение приложенных усилий (средний размер ставки) и процент попаданий в целевой процентиль. Всего было проведено 632 раунда, когда участвующие стратегии предлагали свои ставки.

Результаты. Получены показатели по проведенным испытаниям. Эти данные позволяют сказать, что CSF в каноническом виде подходит для задач оптимизации затрат на участие в приоритезирующих аукционах. Стратегии с параметрами эффективности $R = 10$ и $R = 20$ продемонстрировали лучшие результаты. Кроме этого, было замечено, что с уменьшением параметра эффективности R падает и эффективность стратегии в решении задачи оптимизации.

Заключение. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод об общей эффективности CSF в каноническом виде для оптимизации затрат на приоритезирующие комиссии. Данный подход будет особенно полезен в областях, где активно развивается работа с блокчейном. В первую очередь это сфера работы с финансовым и инвестиционным капиталом, а также трейдинг. Однако стоит отметить, что предложенные методики никак не привязаны к конкретным реализациям или проектам. Они будут работать в любых сетях, которые имплементируют механизм приоритезации пропуска транзакций через дополнительные сборы. В дальнейшем остается

пространство для углубления исследований: введения новых характеристик оценки эффективности стратегий, использования более специализированных наборов данных, изменения размера контекста исторических данных для модели.

Ключевые слова: блокчейн, Contest Success Function, модель Таллока, проценты, теория игр, бескоалиционная игра, аукцион

Для цитирования. Бокун, А. Г. Применение функций успеха в соревновании для оптимизации транзакционных сборов в сетях с высокой пропускной способностью/ А. Г. Бокун // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 80–93. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-80-93>.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Introduction

Today, blockchain networks are gaining increasing institutional adoption, not merely as investment vehicles or stores of value, but as robust infrastructure for payment processing. Consequently, transaction processing speed has become one of the most critical performance characteristics of modern networks. Projects such as The Solana blockchain network (Solana network) and The Open Network (TON) place a significant emphasis on throughput, specifically modifying consensus algorithms and imposing rigorous hardware requirements on node operators. Another instrument for accelerating transaction finalization is the use of priority fees. The network allows the sender to pay an additional fee to increase their probability of winning the auction for transaction inclusion in the upcoming block. Since network validators are incentivized to prioritize transactions with higher priority fees, users can significantly expedite the execution of their transactions.

The mechanism of these auctions, in turn, creates a complex problem: achieving a desired inclusion percentile¹ typically requires higher fee expenditures to ensure timely transaction processing. This problem can be addressed by framing the auction as a contest – a game-theoretic model where participants compete for a prize by exerting efforts. Contest models are employed across diverse fields, ranging from real estate leasing to conflict studies. In these models, the magnitude of the effort exerted directly influences a participant's probability of winning. The mechanism that formalizes this relationship between the probability of winning and the effort expended is the Contest Success Function (CSF), which serves as a cornerstone of such game-theoretic frameworks.

Most existing research on CSF, ranging from foundational texts to contemporary studies, focuses on applying these models to macro-level problems in economics and strategic conflict. The base concept of the CSF originally emerged from efforts to describe the behavior of large economic agents competing for existing resources. In particular, Gordon Tullock's seminal works explore the rent-seeking behavior of such agents [1]. Other research in this field extends the application of CSF to issues of various economic spheres: from taxation to bankruptcy proceedings [2].

¹A percentile is a value that separates the bottom N% of the data from the rest of the results.

A distinct area of study involves the use of CSF within conflict theory, where it is frequently employed to analyze military engagements [3]. For instance, in the work of V. V. Shumov, the CSF is validated using data from military operations of World War I and World War II [4]. However, it should be noted that the number of publications applying CSF to real-world contemporary economic data remains remarkably small; most existing literature focuses primarily on the theoretical modeling of conflicts, contests, and auctions. The novelty of this research lies in the adaptation of the CSF to the micro-level task of real-time transaction fee estimation.

The objective of this paper is to investigate various functions that describe the relationship between the probability of winning and the effort exerted within a contest model, and to evaluate their practical utility and competitiveness within the Solana network environment.

— Fees and Auctions in Solana network

Fees represent a fundamental component of the Solana network. They enable the network to perform load balancing during spikes and lulls in activity, prevent malicious transaction broadcasting intended to congest the network (spam mitigation), and provide economic incentives for validators. The fee structure comprises two distinct elements:

base fee – the mandatory standard charges for transaction processing;

priority fee – optional additional fees paid to increase transaction priority [5].

The base fee is a fixed charge levied on the transaction's originating account (or accounts) for the utilization of network infrastructure and resources. Currently², the base fee is set at 5,000 lamports (0.000005 SOL) per transaction signer (typically, there is only one). As previously noted, this fee is static and remains independent of the actual amount of computational resources consumed by the transaction.

The volume of resources required to execute a transaction in Solana network is measured in Compute Units (CU)³. Thus, Compute Units serve as a metric for the computational complexity of a transaction. The CU count is determined dynamically through an analysis of the executable program's bytecode. The Solana Virtual Machine (SVM) operates using SBF (Solana Bytecode Format), which is a modified version of the Linux eBPF⁴ bytecode. Each SBF instruction has an associated approximate cost in CU; the total transaction cost is the sum of the costs of all operations within its instructions, plus additional overhead (e.g., system calls, Cross-Program Invocation (CPI) operations, and data transmission size).

The incentive structure of the reward system is designed such that it is suboptimal for validators to prioritize transactions with high CU requirements when the base fee remains fixed and uniform for all. To quantify a validator's incentive to include a specific transaction, we propose a metric representing the cost per single CU: *the Compute Unit Price*:

$$cu_{price} = \frac{\sum \phi_n}{cu_{count}}, \quad \phi_n \in \Phi, \quad (1)$$

where cu_{price} is the price per single CU;

²Solana Fees in Theory and Practice. Available at: <https://tinyurl.com/39z3mz7v> (accessed 23.01.2026).

³Lifecycle of a Solana Transaction. Available at: <https://tinyurl.com/mrxpbhfh> (accessed 23.01.2026).

⁴Solana Documentation. Programs. Available at: <https://tinyurl.com/2d34z28u> (accessed 23.01.2026).

cu_{count} is the total number of CUs consumed by the transaction;

ϕ_n is an element of the set Φ , which includes all transaction-related fees (base fees, priority fees, validator-specific tips, etc.).

To address the issue of CU devaluation in computationally intensive transactions, the priority fee mechanism was introduced as an optional feature. The essence of this mechanism lies in increasing the value of $\sum \phi_n$ from equation (1) by incorporating a new fee component – the priority fee – into the set Φ ⁵.

Typically, the priority fee is calculated as the product of the total CU count and the desired price per unit of CU (excluding base fees, which are constant). It is specified in microlamports to ensure it can always be represented as an unsigned integer.

The priority fee mechanism only partially addresses the issue of excessive prioritization for lightweight transactions. Certain services, such as Decentralized Exchanges (DEXs), generate a high volume of simple swaps involving specific accounts, which can hinder the inclusion of critical transactions even when they carry high priority fees. To mitigate this, a further optimization was introduced: *local fee markets*⁶.

The essence of this mechanism lies in partitioning the network into numerous segments centered around specific accounts (for instance, those belonging to the aforementioned DEXs) and establishing an isolated auction for transaction inclusion within each segment. Consequently, only homogeneous transactions compete against one another, allowing the priority fee mechanism to function with greater precision. Each segment maintains its own execution queue, which ensures the timely delivery of transactions to the validator.

Contest Success Function

In game theory, there is a well-established game-theoretic framework for analyzing conflicts by representing them as contests. A contest is defined as a game in which participants exert effort to secure a specific prize [3]. This model is extensively applied across various fields, ranging from military conflict and economic activity to evolutionary biology.

To model such games, a class of functions is employed that maps the formalized efforts of players to their respective probabilities of winning the competition. These are known as CSF [4].

Let us consider an effort vector G , containing numerical representations of the efforts exerted by players to secure winning in the contest. Furthermore, let each player i have a corresponding win probability p_i .

It is important to note that for a more systematic approach to constructing a CSF, three fundamental axioms have been established [6]. These axioms define the baseline conditions for conducting contest-based games:

Axiom 1. The win probability $p_i > 0$ if the effort $G_i > 0$. Furthermore, there is no scenario in which a winner is not determined:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (2)$$

⁵Solana Fees in Theory and Practice. Available at: <https://tinyurl.com/39z3mz7v> (accessed 23.01.2026).

⁶The Truth about Solana Local Fee Markets. Available at: <https://tinyurl.com/ar4ytw6p> (accessed 23.01.2026).

Axiom 2. For all $i \in N$, the probability p_i is monotonically increasing in G_i and monotonically decreasing in G_j , for all $i \neq j$.

Axiom 3. For any permutation π , the following equality holds:

$$p_{\pi(i)}(G) = p(G_{\pi_1}, G_{\pi_2}, \dots, G_{\pi_T}), \quad \forall i \in N. \quad (3)$$

In summary, the first axiom and condition (2) demonstrate that a CSF (let it be a generic function $f(x)$ for better representation) satisfies the two fundamental criteria of a Probability Density Function (PDF), namely:

Non-negativity – the function satisfies $f(x) \geq 0$ for all x ;

Determinism (Normalization) – the sum of outcomes for all possible x $\sum f(x) = 1$ or $\int f(x)dx = 1$, for continuous sets.

In the context of the CSF, the parameter x represents G_i .

Axiom 2 asserts that a player's win probability increases relative to their own effort and decreases relative to the efforts of other players. Axiom 3 describes a crucial condition for conducting a contest: *anonymity*. This dictates that a player's probability of winning must not depend on their identity or the identities of their opponents; only the exerted efforts should be of consequence.

Furthermore, for the sake of simplicity, let us assume (4) that each game involves a minimum of two players:

$$|G| \geq 2. \quad (4)$$

Consequently, the CSF in its general form [2] can be expressed as follows:

$$p_i = \frac{f_i(G_i)}{\sum_{j=1}^n f_j(G_j)}, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

It can be observed that the CSF incorporates a function f_i , known as the *efficiency function*, which describes exactly how the efforts exerted in the game are distributed. In other words, the presence of an efficiency function allows the abstract model to be adapted to various subject areas and to describe them with greater precision. It is crucial to remember that the efficiency function itself must satisfy the CSF axioms.

A canonical example of the efficiency function can be found in the work of Gordon Tullock [1]. He applied the CSF to the rent-seeking market. His version (6) involves raising the measure of effort to a certain scalar power R :

$$p_i = \frac{G_i^R}{\sum_{j=1}^n G_j^R}, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

The scalar R how discriminatory the CSF is, it is used to increase the sensitivity of CSF to changing incoming bids. A higher value of R amplifies the advantage of superior bids, making the auction more deterministic, while a lower R introduces a higher degree of stochasticity into the selection process. In other words, in the limit as R approaches infinity, higher bids win with probability 1, otherwise, in the limit as R approaches zero, each bid wins with probability $\frac{1}{n}$ where n is a general number of bids in the auction.

As an alternative that is more sensitive to small variations in effort, the logit model (7) is used [2]. In this case (7), the evaluation incorporates not only a certain scalar but also exponents:

$$p_i = \frac{e^{kG_i}}{\sum_{j=1}^n e^{kG_j}}, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Some functions (8) suggest applying individual efficiency metrics expressed through weights $w_j > 0$ instead of common scalars for each participant. These weights serve as an indicator of an individual player's personal efficiency:

$$p_i = \frac{G_i w_i}{\sum_{j=1}^n G_j w_j}, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

In some cases (9), games account for a personal bias coefficient $a_i > 0$:

$$p_i = \frac{G_i w_i + a_i}{\sum_{j=1}^n G_j w_j + a_j}, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (9)$$

Options (8) and (9) are frequently combined with the Tullock efficiency function:

$$p_i = \frac{G_i^R w_i + a_i}{\sum_{j=1}^n G_j^R w_j + a_j}, \quad \forall i = 1, \dots, n. \quad (10)$$

In general, any combinations that do not violate the established CSF axioms are permissible. Occasionally, certain efficiency functions emerge that fall outside the standard CSF framework. For instance, there is a model (11) asserting that the difference in effort is the sole determinant of the game's outcome [2]:

$$p_1 = p_1(\sigma G_1 - G_2), p_2 = 1 - p_1, \quad (11)$$

where σ is a common scalar.

Problem Statement

As previously established, auctions for transaction inclusion in blocks occur permanently within each individual local fee market. A distinctive feature of these auctions is that participants can increase their probability of winning by increasing their bid per CU. In other words, there is a direct correlation between the CU price in a transaction and the probability of that transaction being included in a block.

This scenario presents a classic non-cooperative game, where CSF can be applied to describe the dependence between the proposed price and the probability of success (inclusion in a block). The objective of further research will be to evaluate the overall effectiveness of the CSF in solving the problem of optimal fee calculation. By that we mean determining the minimum CU price required to ensure transaction inclusion with a predefined probability threshold. Subsequently, it is necessary to determine which specific functional form of the CSF provides the most accurate model based on the efficiency metric.

The most effective solution will be defined as the one that maximizes the ratio of the success rate (inclusion within the target percentile) to the average proposed CU price over a statistically significant sample of transactions. This efficiency metric is formalized by expression:

$$h = \frac{c}{B_{avg}} \cdot 10000, \quad (12)$$

where c – the success rate, percentage of transactions successfully included in the target percentile;

B_{avg} – the average predicted CU price (average bid).

Therefore, the coefficient h represents the cost-efficiency of the strategy, measured as the success rate per unit of the average bid. It quantifies the yield of inclusion probability relative to the expenditure per CU.

That is, we have two main tasks:

1. Comparative effectiveness analysis: to evaluate the performance of the CSF in predicting optimal transaction fees relative to a baseline solution (the simple moving average of historical fees).

2. Structural optimization: to conduct a comparative assessment of various CSF configurations (by varying the decisiveness parameter R) to identify the functional form that yields the highest predictive accuracy and economic efficiency (using the criterion (12) for estimation).

Working Model

To reiterate, for the purposes of this task, we define the following parameters:

target percentile – the percentile value is determined arbitrarily (set to 70 % for this experiment) and is calculated across all transactions within a block;

winning in the contest – the inclusion of a transaction into the blockchain block within a target percentile;

measure of effort – the price in microlamports offered per CU in the transaction.

A critical feature of the Solana local fee market auction is that the number of participants is not known in advance. This is a significant challenge for the CSF model, which typically assumes a visible (non-hidden) game. To address this, we propose an historical data analysis approach.

While we lack real-time data on current bidders, the blockchain provides a transparent record of participants and their bids in previous blocks. This allows us to calculate the win probability for a hypothetical incoming bid based on past performance.

The approach is as follows: Let B be a specific incoming bid, and BH be a historical dataset of the T most recent blocks (thus $|BH| = T$). From BH , we extract a subset BH_t of size n (the size may vary) representing the bids data from a specific block t . The probability of winning for bid B in block t can then be calculated using formula:

$$P_t(B) = \frac{f(B)}{f(B) + \sum_{j=1}^n f(BH_{tj})}. \quad (13)$$

Consequently, to estimate the total win probability of bid B in the current auction, we can use the mean value of the probability estimates derived from past auctions. The estimation of the probability is described by expression:

$$\hat{P}(B) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t(B). \quad (14)$$

A bid B is considered optimal if it is the minimum possible entry bid such that its win probability $\hat{P}(B)$ is greater than or equal to a pre-defined target inclusion probability P_{target} . The formal condition:

$$B_{opt} = \operatorname{argmin}_B \{B \mid \hat{P}(B) \geq P_{target}\}. \quad (15)$$

Experimental Design

To test the effectiveness⁷ of the win probability predictions, a series of trials will be conducted. In these trials, transaction fees will be calculated using a CSF with various classical efficiency functions. A distinct set of tests will be performed for each efficiency function to evaluate its performance independently.

The trial itself will consist of an auction emulation task within the Solana network. The goal is to predict the CU price (in microlamports) required to reach a specific target percentile in a control block.

⁷According to criterion (12).

A historical data sample BH_w is collected with a window size of $T_w = 20$. Based on this data, a price bid is generated for the subsequent control block using each of the tested strategies. A prediction is deemed successful if the proposed price falls within the specified P_{target} in the control block. Note that no actual transactions will be submitted to the blockchain during this experiment.

It is important to note that the blocks in the historical sample BH_w are not necessarily consecutive; however, they strictly adhere to rule:

$$S'_{i+1} = \min\{x \in S, x > S'_i\}, \quad (16)$$

where S' – the set of slot numbers corresponding to the blocks included in the historical sample BH_w ;

S – the set of slot numbers corresponding to all available blocks for which historical information is recorded.

The slot number for the control block is calculated using formula:

$$S_c = \min\{x \in S, x > \max\{x \in S'\}\}. \quad (17)$$

Since participant bias⁸ and individual efficiency metrics⁹ are irrelevant within the Solana network, the experiment will exclusively utilize the standard Tullock function (6).

The Logit model, on the other hand, proved to be excessively sensitive to minor data fluctuations – a characteristic that is critical, if not fatal, for this specific domain. While this does not imply that the Logit model is fundamentally inapplicable, it clearly necessitates a degree of data preprocessing to be viable.

A naive approach will serve as the competing model for the CSF during the experiment. In this model, the optimal fee is defined as the average fee observed across the historical sample BH_w . To calculate this average, all fees that successfully reached the P_{target} within their respective historical blocks (BH_{wt}) are included. The naive method is formalized by expression (18):

$$B_{opt} = \frac{1}{T_w} \sum_{t=1}^{T_w} \bar{P}_t, \quad (18)$$

where

$$\bar{P}_t = \text{avg}[\text{Percentile}(BH_{wt}, P_{target})]. \quad (19)$$

⁸From model (9).

⁹From model (8).

In summary, the experiment will consist of two distinct rounds of testing:

- testing the standard Tullock function (6);
- testing the competing (naive) model (18).

Within the round dedicated to the standard Tullock function, multiple sets of trials will be conducted using different values for parameter R . These trials are essential because the precise impact of effort (bid amount) on the win probability within the Solana network cannot be determined theoretically. The only reliable method to ascertain which values accurately describe the auction dynamics is through empirical measurement during this experiment.

Results and Data Analysis

A total of 632 trials were conducted. The results regarding the average proposed CU price across the different models and parameters are summarized in table 1.

Table 1
Average Proposed CU Price

Strategy	Decisiveness Parameter (R)	Average Proposed CU Price (microlamports)
Naive Percentile Average	—	519780.02
Standard Tullock CSF	0.0625	2483163.84
	0.125	290720.89
	0.25	120003.72
	0.5	99960.52
	1	97516.06
	5	86047.23
	10	83062.10
	15	82042.25
	20	81538.84

The results for reaching the target percentile are presented in table 2. This table also includes the final strategy efficiency metric.

Table 2
Target Percentile Success Rate

Strategy	Decisiveness Parameter (R)	Target Percentile Success Rate (%)	Strategy Efficiency Metric (h)
Naive Percentile Average	—	87.66	1.686
Standard Tullock CSF	0.0625	80.22	0.323
	0.125	71.20	2.449
	0.25	62.03	5.169
	0.5	60.60	6.062
	1	62.82	6.442
	5	63.61	7.392
	10	62.66	7.543
	15	61.55	7.502
	20	61.55	7.548

Fig. 1 illustrates the graph of the predicted CU price values relative to the control block number.

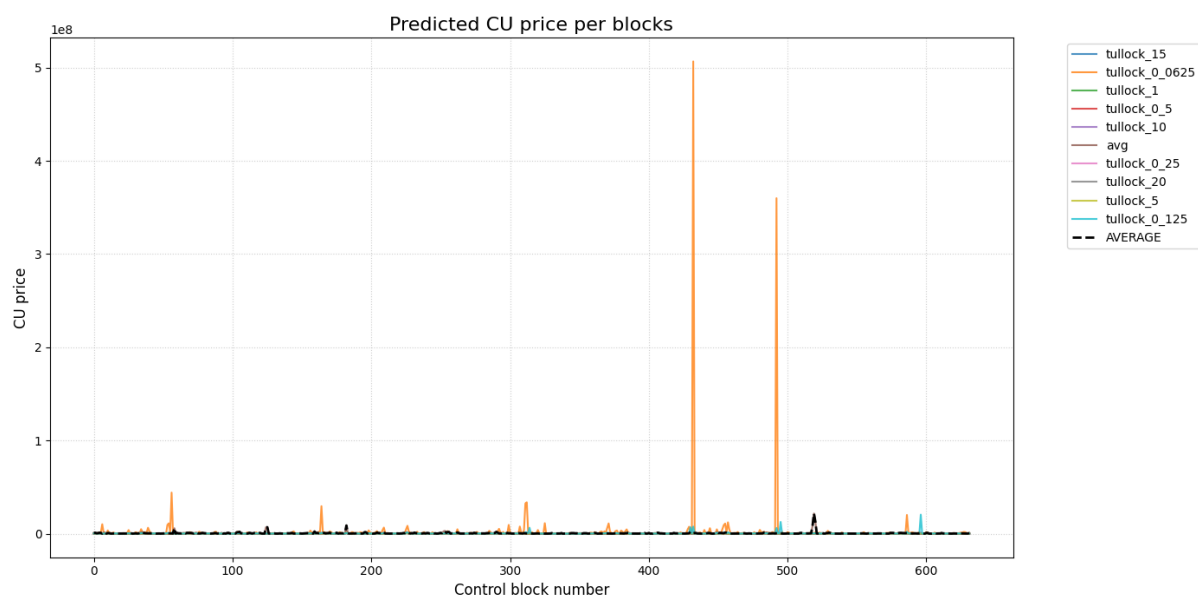


Fig. 1. Plot of the predicted CU price values relative to the control block number

As illustrated in fig. 1, the tullock_0_0625 strategy (Standard Tullock CSF with $R = 0.0625$) produces disproportionately higher CU prices compared to all other evaluated strategies. Due to this significant scale disparity, which obscures the performance of alternative models, this specific plot is omitted from fig. 2 to provide a clearer visual comparison of the remaining results.

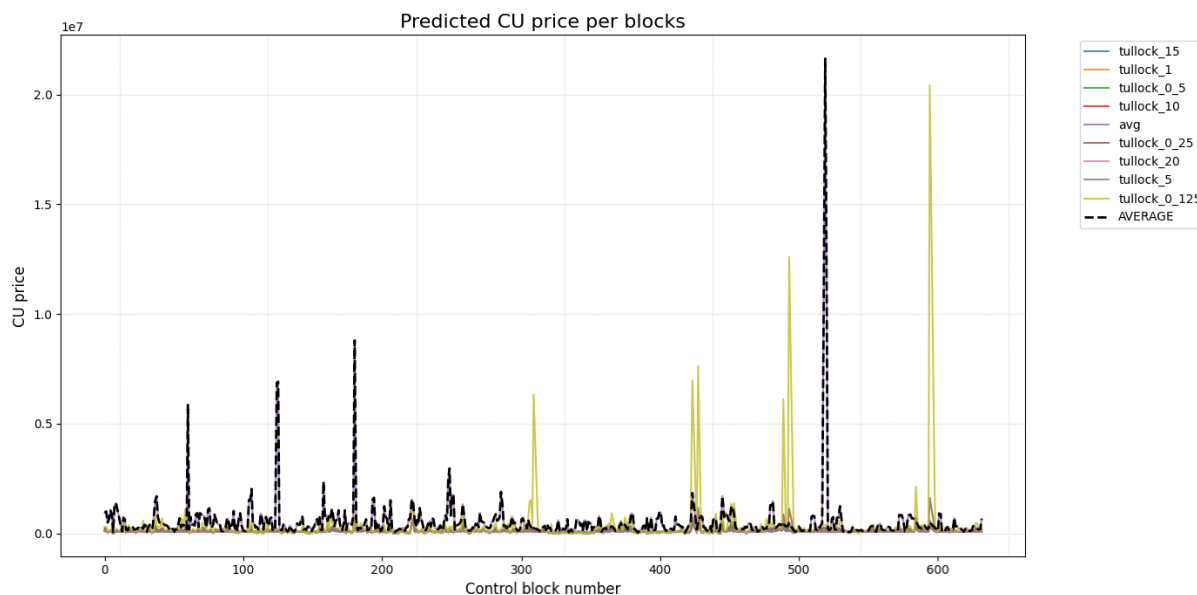


Fig. 2. Plot of the predicted CU price values relative to the control block number (without tullock_0_0625)

The scale of fig. 2 allows for a better assessment of the robustness of each solution to volatility and sudden data fluctuations within individual blocks (e.g., abnormally high auction activity). It is evident that all solutions, except for tullock_0_125 and the simple average (baseline), remain relatively stable. Furthermore, the behavior of tullock_0_125 aligns closely with the expected performance of models characterized by a low R parameter.

Conclusion

The results indicate that the Tullock strategy with a decisiveness parameter of $R = 20$ demonstrated the best¹⁰ overall efficiency. It reduced fee expenditures by more than sixfold, while incurring a 26 % loss in percentile hit accuracy compared to the simple average strategy. In this configuration, the method can be useful for regular users or services that perform a large number of transactions. That is, all those who are not too sensitive to the loss of accuracy and willing to exchange it for savings.

For time-sensitive transactions, we recommend using CSF with $R = 0.125$. This setting provides a higher level of accuracy (16 % loss) while still maintaining a twofold reduction in fees. The parameter value of $R = 0.0625$ proved to be inapplicable for solving this particular problem, as its extreme sensitivity to outlier bids (fee spikes) from other participants led to inconsistent performance.

¹⁰According to criterion (12).

These findings suggest that the decisiveness parameter R serves as a powerful tuning mechanism for model efficiency. It allows the solution to be adapted not only to diverse user requirements but also to be dynamically adjusted based on real-time network congestion and load.

The obtained results allow for the conclusion that the CSF based on the standard Tullock model can successfully compete with the simple average algorithm in terms of CU price prediction efficiency within Solana network auctions. This makes it worthwhile to further explore the prospects of applying such models to optimize transaction costs in networks with similar architectures.

In particular, future research should expand the set of collected metrics by including the mean deviation from the target percentile. Furthermore, data collection should encompass not only standard priority fees but also tips collected by modified validators¹¹ for the right to include transactions in specialized bundles for accelerated processing.

References

1. Tullock G. *Efficient Rent Seeking*. New York, Springer, 2001, 408 p.
2. Corchon L. C., Dahm M. Foundations for contest success functions. *Economic Theory*, 2010, no. 43, pp. 81–98. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1144105>.
3. Hwang S.-H. *Contest success functions: Theory and evidence. Working paper*. Amherst, MA, University of Massachusetts, 2009, 26 p. <https://doi.org/10.7275/1066820>.
4. Shumov V. V. A study of contest success function for battles (combats, operations). *Control Sciences*, 2020, iss. 6, pp. 19–30 (In Russ.). <https://doi.org/10.25728/pu.2020.6.3>.
5. Zheng X., Wan Z., Lo D., Xie D., Yang X. Why does my transaction fail? A first look at failed transactions on the Solana blockchain. *Proceedings of the ACM on Software Engineering*, 2025, no. 2, pp. 1489–1512. <https://doi.org/10.1145/3728943>.
6. Scaperdas S. Contest success functions. *Economic Theory*, 1996, no. 7, pp. 283–290. <https://doi.org/10.1007/BF01213906>.

Information about the author

Artyom G. Bokun, Assistant of the Department of Computer Science, Undergraduate, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: a.bokun@bsuir.by
<https://orcid.org/0009-0006-7962-9152>

Информация об авторе

Бокун Артем Геннадьевич, ассистент кафедры информатики, магистрант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: a.bokun@bsuir.by
<https://orcid.org/0009-0006-7962-9152>

¹¹e.g., Jito.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

INFORMATION PROTECTION AND SYSTEM RELIABILITY

УДК 004.832.519.6

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-94-106>

Поступила в редакцию | Received 22.04.2026

Подписана в печать | Accepted 11.05.2026

Опубликована | Published 30.06.2026

Квантовый блокчейн с интеграцией квантовой запутанности и алгоритма консенсуса

А. В. Сидоренко✉, И. А. Приходько

✉E-mail: sidorenkoa@yandex.by

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

Аннотация

Цели. Целями работы являются разработка и программная реализация концептуальной модели квантово-защищенного блокчейна путем интеграции механизма квантового распределения ключей на основе протокола E91 в классическую архитектуру.

Методы. Рассмотрены вопросы уязвимости классических криптографических механизмов блокчейна к угрозам со стороны квантовых вычислений. Для создания устойчивой архитектуры предложено объединить свойства квантовой запутанности и классические криптографические методы. В качестве базы использован протокол квантового распределения ключей E91, основанный на квантовой запутанности и проверке неравенства Белла (CHSH-тест). Для связи блоков в цепочку введено новое поле E91 MAC, вычисляемое с помощью алгоритма HMAC от хеша предыдущего блока с использованием ключа, сгенерированного протоколом E91. В качестве механизма консенсуса выбран алгоритм DPoS (Delegated Proof of Stake).

Программная реализация включает симуляцию протокола E91 с использованием облачной платформы IBM Quantum и библиотеки Qiskit, а также развертывание одноранговой блокчейн-сети с CLI-интерфейсом на Python с помощью TCP-сокетов.

Результаты. Разработана концептуальная модель и реализован прототип квантово-защищенного блокчейна. Создана функциональная одноранговая сеть с алгоритмом консенсуса DPoS и механизмом распределенного голосования. Успешно выполнена симуляция протокола E91, подтверждающая возможность генерации и верификации квантового ключа. Доказана принципиальная осуществимость интеграции квантового механизма аутентификации (E91 MAC) в процесс создания и валидации блоков.

Заключение. Предложенная гибридная архитектура демонстрирует новый подход к безопасности блокчейна, основанный не только на вычислительной сложности, но и на фундаментальных законах квантовой механики. Интеграция протокола E91 и механизма DPoS обеспечивает потенциальную устойчивость к квантовым атакам и высокую энергоэффективность сети. Программный прототип подтверждает практическую реализуемость концепции для создания защищенных распределенных реестров нового поколения.

Ключевые слова: информация, защита, квантовый блокчейн, квантовая запутанность, распределение ключей, протокол E91, алгоритм DPoS, консенсус, квантовая криптография, средства разработки Qiskit

Для цитирования. Сидоренко, А. В. Квантовый блокчейн с интеграцией квантовой запутанности и алгоритма консенсуса / А. В. Сидоренко, И. А. Приходько // Информатика. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 94–106. – <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-94-106>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Quantum blockchain based on integration of quantum entanglement and consensus algorithm

Alevtina V. Sidorenko[✉], Ivan A. Prikhodko

[✉]E-mail: sidorenkoa@yandex.by

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

Abstract

Objectives. The aim of this work is to develop and implement a conceptual model of a quantum-secured blockchain by integrating a quantum key distribution mechanism based on the E91 protocol into a classical architecture.

Methods. The vulnerabilities of classical blockchain cryptographic mechanisms to threats posed by quantum computing are considered. To create a resilient architecture, it is proposed to combine the properties of quantum entanglement with classical cryptographic methods. The E91 quantum key distribution protocol, based on quantum entanglement and the Bell inequality test (CHSH test), is used as the foundation. A new field, E91 MAC, is introduced to link blocks in the chain, calculated using the HMAC algorithm from the hash of the previous block with a key generated by the E91 protocol. The Delegated Proof of Stake (DPoS) algorithm is chosen as the consensus mechanism.

The software implementation includes simulating the E91 protocol using the IBM Quantum cloud platform and the Qiskit library, as well as deploying a peer-to-peer blockchain network with a CLI interface in Python using TCP sockets.

Results. A conceptual model was developed and a prototype of a quantum-secured blockchain was implemented. A functional peer-to-peer network with the DPoS consensus algorithm and a distributed voting mechanism was created. The successful simulation of the E91 protocol confirmed the possibility of generating and verifying a quantum key. The fundamental feasibility of integrating a quantum authentication mechanism (E91 MAC) into the block creation and validation process was demonstrated.

Conclusion. The proposed hybrid architecture demonstrates a novel approach to blockchain security, based not only on computational complexity but also on the fundamental laws of quantum mechanics. The integration of the E91 protocol and the DPoS mechanism provides potential resilience to quantum attacks and high network energy efficiency. The software prototype confirms the practical feasibility of the concept for creating secure next-generation distributed ledgers.

Keywords: information, security, quantum blockchain, quantum entanglement, key distribution, E91 protocol, DPoS algorithm, consensus, quantum cryptography, Qiskit development tools

For citation. Sidorenko A. V., Prikhodko I. A. *Quantum blockchain based on integration of quantum entanglement and consensus algorithm*. Informatika [Informatics], 2026, vol. 23, no. 2, pp. 94–106 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2026-23-2-94-106>.

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

Введение

Развитие информационных систем с использованием технологии блокчейна произвело революционный скачок в области хранения и передачи данных, предложив децентрализованные, прозрачные и в определенной степени неизменяемые реестры. Основой безопасности классических блокчейнов являются криптографические хеш-функции, объединяющие блоки в непрерывную цепочку, и механизмы консенсуса, обеспечивающие согласованность информационных данных между участниками сети [1, 2].

Конфиденциальность и целостность данных в блокчейне создают хеш-функции и алгоритмы консенсуса, что дает возможность функционировать целой распределенной платформе, построенной от ряда структур данных блокчейна. Каждый блок блокчейна в формируемой цепочке содержит криптографический хеш, который определяется на основе содержания блока, включая хеш предварительного блока. Если данные в формируемом блоке не совпадают с хешем, то происходит изменение этого блока. Это указывает на махинацию (или нелегитимный доступ) и приводит к разрыву созданной цепочки блоков. Таким образом, свойства хеш-функции играют критическую роль в обеспечении секретности и интегрируемости структуры данных блокчейна. Алгоритмы консенсуса или смарт-контракты создают условия, при которых происходит формирование временной метки для периодического доступа делегатам, участвующим в создании блоков блокчейна. Среди используемых в блокчейне механизмов консенсуса выделяется DPoS, который не использует мощность компьютера в качестве решающего фактора и может поддерживать регламент в работе блокчейна [3–5].

Возникает необходимость перехода к новым методам криптографии, способным обеспечивать надежную защиту в квантовую эпоху [6]. Бурное развитие квантовых вычислений и компьютеров способствует разработке принципов квантовой криптографии, в основе которых лежит протокол квантового распределения ключей (Quantum Key Distribution, QKD) – инновационный протокол, использующий принцип суперпозиции и квантовой запутанности для безопасного распределения ключей шифрования.

В данной работе авторами предлагается новая концепция, заключающаяся в интеграции в архитектуру блокчейна механизма квантовой запутанности, лежащего в основе квантового распределения ключей, и обосновании «квантового» характера предложенной системы в контексте данной интеграции, причем речь идет о концептуальной модели и ее программной реализации.

Прежде чем перейти к описанию концепции и ее программной реализации, рассмотрим некоторые дополнительные аспекты.

===== Квантовое распределение ключей

При рассмотрении вопросов квантовой криптографии существенным являются понятия квантовой запутанности и квантовой суперпозиции.

Квантовой запутанностью могут обладать два или более кубита, и она выражается в особой корреляции между ними, которая может быть подтверждена с помощью нарушений неравенства Белла [7].

Квантовая суперпозиция – принцип, описывающий способность кубитов существовать в нескольких состояниях одновременно до момента измерения.

Квантовое распределение ключей как новое решение проблемы распределения в последнее время вызывает большой исследовательский интерес. Оно представляет собой метод безопасного распределения ключей шифрования, использующий свойства квантовой механики. Существует несколько различных протоколов для квантового распределения ключей, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Наиболее часто используемыми являются протоколы BB-84, B-92, E-91 и SARG-04. Протокол E-91 основан на квантовой запутанности между двумя сторонами [8].

Доверенным источником (условный *Charlie*) генерируется запутанная пара частиц, квантовое состояние которых характеризуется состояниями Белла, после чего одна частица отправляется по квантовом каналу Алисе, а другая – Бобу (рис. 1).

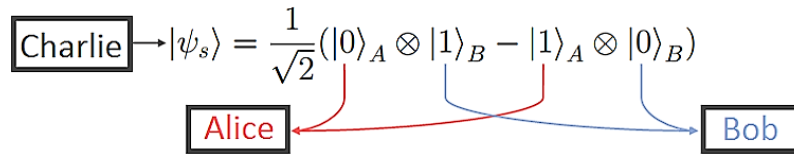


Рис. 1. Схема распределения частиц между Алисой и Бобом

Fig. 1. Diagram of particle distribution between Alice and Bob

Алиса и Боб генерируют строки $b = (b_1, \dots, b_N)$ и $b' = (b'_1, \dots, b'_N)$, где $b_i, b'_j = 1, 2, 3 \dots$, и в соответствии с элементами этих строк проводят измерение проекции спинов полученных частиц на следующие направления (рис. 2):

$$\begin{aligned} b_i = 1: \vec{a}_1 &= (1, 0, 0) \quad (X \text{ observable}), & b'_j = 1: \vec{b}_1 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \quad (W \text{ observable}), \\ b_i = 2: \vec{a}_2 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \quad (W \text{ observable}), & b'_j = 2: \vec{b}_2 &= (0, 0, 1) \quad (Z \text{ observable}), \\ b_i = 3: \vec{a}_3 &= (0, 0, 1) \quad (Z \text{ observable}), & b'_j = 3: \vec{b}_3 &= \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \quad (V \text{ observable}). \end{aligned}$$

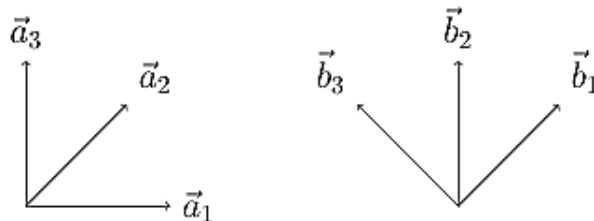


Рис. 2. Направления измерения проекций спинов в протоколе E-91

Fig. 2. Directions for measuring spin projections in the E-91 protocol

Из результатов измерений участники формируют строки $a = (a_1 \dots a_N)$ и $a' = (a'_1 \dots a'_N)$, где $a_i, a'_j = \pm 1$ (рис. 3).

Bit Number	1	2	3	4	5	6
Alice's random bases	×	×	+	+	×	+
Alice's observations	↗	↖	→	↑	↗	→
Bob's random bases	×	+	+	×	×	+
Bob's observations	↗	→	→	↗	↗	→

Рис. 3. Измерения Алисы и Боба в случайно выбранных ими базисах

Fig. 3. Alice and Bob's measurements in randomly chosen bases

Далее Алиса и Боб по классическому каналу связи сравнивают базисы, в которых проводили измерения состояний частиц, т. е. строки $b = (b_1 \dots b_N)$ и $b' = (b'_1 \dots b'_N)$ (рис. 4).

Bit Number	1	2	3	4	5	6
Alice's random bases	×	×	+	+	×	+
Public channel	↕	↕	↕	↕	↕	↕
Bob's random bases	×	+	+	×	×	+
Agree	✓		✓		✓	✓

Рис. 4. Сравнение по открытому каналу связи базисов измерений

Fig. 4. Comparison of measurement bases over an open communication channel

Из элементов строк a и a' , полученных после измерения проекций спинов на одно и то же направление, Алиса и Боб получают ключ. Участники знают, что выполняется выражение (1) и уверены, что получают противоположные результаты измерений, т. е. $a_k = -a'_k$:

$$\langle (\vec{a} \cdot \vec{\sigma})_A \otimes (\vec{b} \cdot \vec{\sigma})_B \rangle_{\rho_s} = -\vec{a} \cdot \vec{b}. \quad (1)$$

В отличие от протокола BB-84, результаты измерений проекций спинов частиц на разные направления используются для вычисления корреляционного значения, определяемого выражением

$$\langle X \otimes W \rangle_{\rho_s} - \langle X \otimes V \rangle_{\rho_s} + \langle Z \otimes W \rangle_{\rho_s} + \langle Z \otimes V \rangle_{\rho_s} = -2\sqrt{2}. \quad (2)$$

Если оно значительно отличается от $-2\sqrt{2}$, то это значит, что запутанность состояний была нарушена либо шумами в квантовом канале, либо фактом прослушивания канала.

Одной из особенностей данного протокола является то, что источник запутанных пар частиц, который распределяет кубиты между Алисой и Бобом, может быть в распоряжении у третьей стороны, в том числе и необязательно доверенной. Таким образом, даже если оборудование, которое создает запутанные состояния, принадлежит злоумышленнику, это не даст последнему никаких преимуществ при подслушивании. Протокол рассматривается как перспективный с точки зрения повышения безопасности распределения ключей, поскольку позволяет не только генерировать секретный ключ, но и проводить внутреннюю проверку целостности канала связи.

Интеграция квантовой запутанности в архитектуру блокчейна

Блокчейн – это децентрализованная распределенная база данных, реализуемая в виде последовательной и криптографически связанной цепочки блоков. Каждый блок содержит записи транзакций и связан с предыдущим посредством криптографического хеш-функционала, что обеспечивает неизменяемость и верифицируемость всей истории данных. Формально структура блока в классической реализации включает следующие элементы [9]:

данные – полезная нагрузка блока, содержащая информацию о транзакциях или событиях;

временную метку – время создания блока;

хеш предыдущего блока (криптографический хеш блока $H(N-1)$) – классический SHA-256-хеш блока $(N-1)$, обеспечивающий базовую связность и обнаружение изменений;

E91 MAC – код аутентификации хеш-значения предыдущего блока.

Механизм E91 MAC является комбинацией метода криптографической аутентификации HMAC (Hash-based Message Autentification Code) и протокола квантового распределения ключей E-91. Для обеспечения целостности и конфиденциальности данных в блокчейне механизм генерации значения E91 MAC использует как криптографическую хеш-функцию, так и общий секретный ключ, сгенерированный посредством симуляции протокола квантового распределения ключей E91;

хеш текущего блока $H(N)$ – классический SHA-256-хеш, вычисленный из совокупности всех остальных полей блока N , включая E-91 MAC.

Безопасность блокчейна определяется, с одной стороны, стойкостью применяемых криптографических алгоритмов (например, SHA-256, ECDSA), а с другой – надежностью используемых децентрализованных механизмов достижения консенсуса между узлами. Однако развитие квантовых вычислительных технологий создает потенциальные угрозы, которые могут существенно снизить эффективность и надежность данных компонентов. В связи с этим возникает необходимость в создании новых архитектур, где безопасность обеспечивается не только за счет математической сложности, но и за счет фундаментальных физических свойств квантовых систем. Одним из таких свойств является *квантовая запутанность* – явление, при котором квантовые состояния двух или более частиц оказываются неразрывно коррелированными независимо от расстояния между ними.

Разработанная концепция

В данной работе авторами предлагается новая концепция безопасной связи блоков, в рамках которой в классическую структуру блока добавляется дополнительное поле – E91 MAC. Это поле представляет собой результат выполнения алгоритма HMAC, примененного к хешу предыдущего блока. Принципиальной особенностью данного подхода является способ генерации ключа, используемого в HMAC [8, 10]. Ключ формируется не классическими средствами, а с помощью протокола квантового распределения ключей E91, основанного на механизме квантовой запутанности и проверке неравенства Белла в форме CHSH.

Таким образом, сообщением для HMAC служит условный SHA-256-хеш предыдущего блока $H(N-1)$, а ключом – безопасно сгенерированный при помощи протокола E91 секретный ключ K . Ключ может быть использован для шифрования только в случае успешного прохождения CHSH-теста, подтверждающего наличие истинной квантовой запутанности и, следовательно, отсутствия прослушивания. Это позволит не только усилить доверие к корректности вычисленного значения E91 MAC, но и ввести новый уровень проверки подлинности и целостности. Валидаторы, обладающие доступом к тому же ключу K , могут независимо пересчитать и верифицировать значение E91 MAC, удостоверившись, что блок был создан авторизованной стороной и не был модифицирован.

Формирование целостной цепочки блоков

Определяется хеш предыдущего блока $H(N-1)$:

1. Выполняется симуляция протокола квантового распределения ключей E91 для генерации уникального ключа K . Если генерация неуспешна (провалена проверка неравенства Белла в форме CHSH (11)), создание блока прерывается.

2. От хеш-значения предыдущего блока с применением секретного ключа K , сгенерированного на предыдущем этапе, вычисляется E91 MAC. Используется, например, стандартный HMAC-SHA256.

3. Проверяется, соответствует ли $H(N-1)$ хешу реально существующего и валидного предыдущего блока.

4. Валидатор, имеющий безопасный доступ к ключу K , который был использован при создании этого блока, сравнивает исходное значение E91 MAC, хранящееся в блоке, с вычисленным лично.

5. Если “E91MAC_origin” = “E91MAC_calculated”, валидатор может быть уверен в следующем:

- целостность данных транзакции, хеша предыдущего блока $H(N-1)$ и ключа K не нарушена;

- создание транзакции и блока инициировано тем, кто владеет ключом K (аутентификация).

6. Формируется тело блока, включающее:

- данные о транзакциях;
- временную метку;
- хеш предыдущего блока $H(N-1)$;
- E91 MAC;
- хеш текущего блока $H(N)$ от всего содержимого.

Роль квантовой запутанности в концепции

Безопасная связь блоков: в разработанной концепции аутентификация опирается не только на секретность ключа K , но и на гарантии безопасности самого процесса генерации этого ключа, основанные на запутанности. Попытка получить K через подслушивание была бы обнаружена благодаря свойствам запутанности (через CHSH-тест). Это отличает данный подход от использования ключей, распределенных классическими методами, которые могут быть уязвимы к подслушиванию без обнаружения, или асимметричными методами, уязвимыми к квантовым компьютерам.

Следовательно, хотя предложенный блокчейн является гибридной системой и использует симуляцию, его концептуальная основа безопасности в части связывания блоков непосредственно связана с квантовой запутанностью через протокол E91.

Важно четко определить, почему предложенная концепция может быть охарактеризована как «квантовая» несмотря на то, что основная структура и обработка данных выполняются на классических компьютерах в рамках симуляции.

Фундаментальная роль запутанности: «квантовая черта» концепции проистекает из интеграции симулированного протокола квантового распределения ключей E91 в ме-

ханизм обеспечения безопасности. Другими словами, безопасность ключа К, используемого для защиты связи между блоками, в протоколе E91 напрямую основана на квантовой запутанности.

Проверка неравенства Белла как индикатор запутанности: проверка нарушения неравенства CHSH, являющаяся неотъемлемой частью протокола E91 в предложенной концепции, – это прямой способ убедиться в наличии сильных квантовых корреляций, свойственных запутанности. Провал данного теста в симуляции интерпретируется как обнаружение атаки, предотвращая использование скомпрометированного ключа для защиты связи блоков.

===== Ключевые особенности концепции

Концептуальное усиление безопасности: добавляет дополнительный уровень защиты к хеш-цепочке, основанный на принципах квантового распределения ключей, устойчивых (теоретически) к подслушиванию.

Обнаружение вмешательства при генерации ключа: интегрированный (симулированный) тест CHSH позволяет обнаруживать попытки компрометации ключа К во время его генерации.

Перспективная устойчивость: хотя сам HMAC и хеш остаются классическими, безопасность ключа, используемого в E91 MAC, опирается на квантовые принципы, потенциально более устойчивые к будущим угрозам, чем классическое распределение ключей.

===== Алгоритмы консенсуса

Алгоритмы консенсуса блокчейна представляют собой совокупность принципов и правил, благодаря которым все участвующие в сети узлы (ноды) автоматически приходят к консенсусу, т. е. обеспечивается как безопасность сети, так и достоверность всех хранящихся в ней данных.

С учетом стремительного развития квантовых вычислений становится очевидным, что использование вычислительной мощности в качестве средства достижения консенсуса, как это реализовано, например, в алгоритме PoW (Proof of Work), представляется нецелесообразным для блокчейн-систем, устойчивых к квантовым атакам. У альтернативных механизмов консенсуса, не зависящих от ресурсоемких решений, можно выделить, например, DPoS, который представляет собой алгоритм, ориентированный на демократическое управление сетью и обеспечение высокой производительности без использования интенсивных вычислений [9]. Он является модификацией алгоритма PoS (Proof of Stake), в котором владельцы цифровых активов голосуют за делегатов (валидаторов), наделенных правом создания и верификации блоков. Алгоритм консенсуса DPoS устраняет необходимость решения сложных криптографических задач, что способствует снижению энергопотребления и повышению масштабируемости сети.

Алгоритм консенсуса DPoS, таким образом, обоснован как приоритетный для использования в защищенных распределенных реестрах нового поколения.

===== Разработанный алгоритм интеграции квантовой запутанности

Этапы разработанного алгоритма сводятся к следующему [10]:

1. Привести ключ, сгенерированный протоколом E91, к размеру блока соответствующей хеш-функции H.

2. Разбить сообщение M (в рассматриваемом случае хеш-значение предыдущего блока) на блоки размером b байт.

3. Склеить строку (последовательность байт) $K_0 \oplus opad$ с каждым блоком сообщения M :

$opad$ (outer padding (внешний наполнитель): константа $0x5C$, повторяемая до длины блока хеш-функции.

4. К строке, полученной на предыдущем шаге, применить хеш-функцию H .

5. Склеить строку $K_0 \oplus opad$ со строкой, полученной от хеш-функции H на предыдущем шаге:

$ipad$ (inner padding, внутренний наполнитель): константа $0x36$, повторяемая до длины блока хеш-функции (например, 64 байта для SHA-256).

6. К строке, полученной на предыдущем шаге, применить хеш-функцию H .

Полученное алгоритмом HMAC значение вносится как новое поле блока E91 MAC, создание которого и иницирует один из узлов.

Валидатор, имеющий безопасный доступ к ключу K , который был использован при создании этого блока, пересчитывает ожидаемое значение E91 MAC с помощью того же алгоритма. Если E91 MAC исходный совпадает с E91 MAC вычисленным, то валидатор может быть уверен в следующем:

- целостность данных транзакции хеш-значения предыдущего блока $H(N-1)$ ключа K не нарушена;

- создание транзакции и блока иницировано тем, кто владеет ключом K (аутентификация).

Элементы программной реализации интеграции квантовой запутанности в архитектуру блокчейна

Программная реализация PoC (Proof of Concept) представляет собой доказательство осуществимости концепции, т. е. демонстрирует практическую осуществимость интеграции квантовой запутанности в прототип одноранговой (*peer-to-peer*) блокчейн-сети.

В данной работе архитектура блокчейна реализована на языке программирования Python с использованием TCP-сокетов, т. е. узлы сети обмениваются данными по локальной сети через соединения, установленные по протоколу TCP (Transmission Control Protocol). Протокол TCP отвечает за транспортировку и маршрутизацию данных через сетевую архитектуру и обеспечение их доставки определенным узлам, указанным IP. Реализованный прототип демонстрирует принципы децентрализованного взаимодействия узлов, автоматического восстановления сети и базовой реализации блокчейна.

В рамках расширения функциональности прототипа децентрализованной блокчейн-сети было принято решение внедрить механизм консенсуса DPOS.

Компьютерная программа организована следующим образом:

blockchain – управляет цепочкой блоков, включая добавление новых блоков и валидацию цепи;

transaction – описывает транзакцию между участниками сети;

server – отвечает за прием входящих соединений от клиентов и управление списком подключенных узлов;

client – обеспечивает подключение к серверу и взаимодействие пользователя с сетью;

superpeer – объединяет функциональность клиента и сервера, выступая в роли центрального узла при отсутствии других суперузлов;

peer – представляет обычный узел сети, функционирующий как клиент.

Для реализации сетевых соединений в проекте используются модули `socket` и `hashlib` для вычисления хешей при создании блоков и, следовательно, для обеспечения целостности данных.

Сеть функционирует по следующему алгоритму:

1. При запуске программа пытается подключиться к суперузлу, выполняющему функции как клиента, так и сервера, адрес которого хранится в файле *server_tracker.txt*.

2. Если подключение успешно, узел функционирует как клиент (*peer*).

3. Если подключение не удалось (например, суперузел недоступен), узел становится суперузлом (*superpeer*) и записывает свой адрес в *server_tracker.txt*, чтобы другие узлы могли к нему подключиться.

Обработка подключений: серверная часть каждого суперузла ожидает входящих соединений от клиентов. При подключении нового клиента сервер добавляет его в список активных узлов и рассылает обновленный список всем участникам сети. Это позволяет каждому узлу иметь актуальную информацию о структуре сети и поддерживать соединения с другими участниками.

Распространение данных: все данные, включая новые транзакции и блоки, передаются между узлами посредством обеспечения синхронизации состояния блокчейна между всеми участниками сети.

Такой подход обеспечивает децентрализацию и устойчивость сети: при отключении текущего суперузла один из клиентов автоматически берет на себя его роль, предотвращая остановку всей сети.

===== Программная реализация протокола E91

Реализация протокола E91 представляет собой компьютерное моделирование его выполнения на симуляторе квантовых вычислений и на квантовых устройствах компании IBM с использованием Qiskit (Quantum information software kit).

Qiskit – это набор средств разработки с открытым исходным кодом для работы с квантовыми устройствами облачной платформы IBM Q в OpenQASM-языке, созданном для взаимодействия с IBM Q и позволяющем экспериментировать с квантовыми схемами, в виде которых удобно представлять последовательность операций над *q*-битами.

IBM Quantum Platform – облачная платформа, которая предоставляет возможность работы на квантовом компьютере. Устройства построены на сверхпроводящих *q*-битах, работа которых основана на эффекте Джозефсона: между сверхпроводниками, разделенными тонким слоем диэлектрика, течет ток. С помощью этого набора можно писать, компилировать и запускать программы на различных устройствах и симуляторах. Кроме того, в Qiskit встроен симулятор, которым можно пользоваться без подключения к облачной платформе IBM Q. Он позволяет моделировать выполнение квантовых вычислений с присутствием шумов, которые возникают при работе реальных устройств. Qiskit служит связующим звеном между пользователем и квантовыми устройствами IBM Q. Набор

использует язык Python. Это значит, что пользователь может манипулировать реальными или симулированными q -битами и при этом применять все возможности языка Python для каких-либо промежуточных вычислений и операций.

===== Заключение

В исследовании разработана и программно реализована концептуальная модель квантово-защищенного блокчейна, в которой в классическую архитектуру интегрирован механизм квантового распределения ключей на основе протокола E91.

Принципиальным отличием предложенной модели является включение в классическую структуру блока поля E91 MAC, вычисляемого от хеш-значения предыдущего блока с помощью ключа, полученного протоколом E91, и алгоритма HMAC. Комбинация этого алгоритма и проверки неравенств Белла (CHSH) для генерации и аутентификации секретного ключа обеспечивает криптографическую проверку подлинности. Такая интеграция дает дополнительный уровень безопасности – не основанный на вычислительной сложности, а вытекающий из физических законов квантовой механики.

В работе обоснован выбор и предложен механизм консенсуса DPoS, реализованный в рамках одноранговой блокчейн-сети на языке программирования Python с использованием TCP-сокеты. Пользователю предоставляется CLI-интерфейс, позволяющий проводить транзакции, участвовать в голосовании за делегатов и инициировать создание блоков. Каждый блок содержит не только данные транзакций и хеши, но и поле E91 MAC, подтверждающее подлинность предыдущего блока на основе квантово-сгенерированного ключа.

Программная реализация симуляции протокола E91 с использованием облачной платформы IBM Quantum Platform и библиотеки Qiskit и интеграция DPoS в архитектуру блокчейна с CLI-интерфейсом и функционалом распределенного голосования продемонстрировали принципиальную осуществимость концепции.

Вклад авторов. *А. В. Сидоренко* осуществила сбор, анализ и оформление результатов работы и подготовила окончательный вариант статьи. *И. А. Приходько* предложил концепцию работы и реализовал компьютерную программу, объединив свойства квантовой запутанности и классических компьютерных методов.

===== Список использованных источников

1. Звозникова, Г. А. Обзор алгоритмов технологии блокчейн / Г. А. Звозникова // Теория и практика современной науки. – 2020. – № 5 (59). – С. 187–190.
2. 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>.
3. 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: 13.03.2026).
4. Belkhir, M. Quantum vs classic computing: a comparative analysis / M. Belkhir, H. Benkaouha, E. Benkhefifa // Proc. of Seventh Intern. Conf. on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC), Paris, France, 12–15 Dec. 2022. – Paris, 2022. – P. 1–8. – <https://doi.org/10.1109/FMEC57183.2022.10062753>.
5. Сидоренко, А. В. Квантовое распределение ключа в квантовой криптографии / А. В. Сидоренко, И. А. Приходько // Военная безопасность государства в современных условиях : тез. докл. Междунар.

воен.-науч. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 24–25 апр. 2024 г. – Мн. : Военная академия Республики Беларусь, 2024. – С. 535.

6. Nguyen, G. T. A survey about consensus algorithm used in Blockchain / G. T. Nguyen, K. Kim // *Journal of Information Processing Systems*. – 2018. – Vol. 14. – P. 101–128.

7. The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation / ed.: D. Bouwmeester [et al.]. – Berlin : Springer, 2000. – 350 p.

8. Artur, K. A quantum cryptography based on Bell's theorem / K. Artur, A. Ekert // *Physical Review*. – 1991. – Vol. 67. – P. 661–663.

9. Приходько, И. А. Компьютерная программа для квантового распределения ключей / И. А. Приходько // Материалы XIII Межвуз. науч.-техн. конф. курсантов и магистрантов факультета связи и автоматизированных систем управления, Минск, 22 мая 2024 г. – Мн. : Военная академия Республики Беларусь, 2024. – С. 22.

10. Сидоренко, А. В. Квантовое распределение ключей и алгоритмы консенсуса при квантовом шифровании / А. В. Сидоренко, И. А. Приходько // Технические средства защиты информации : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8 июня 2025 г. – Мн. : БГУИР, 2025. – С. 289–292.

References

1. Zvoznikova G. A. *Survey of technology algorithms blockchain*. Teorija i praktika sovremennoj nauki [The Theory and Practice of Modern Science], 2020, no. 5 (59), pp. 187–190 (In Russ.).

2. Sidorenko A. V., Shishko M. S. Hashing technique based on SHA-3 using chaotic maps. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 109–118 (In Russ.). <http://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-1-109-118>.

3. Kiktenko E. O., N. O. Pozhar, M. N. Anufriev, A. S. Trushechkin, R. R. Yunusov, ..., Fedorov A. K. *Quantum-secured blockchain*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1705.09258> (accessed 13.03.2026).

4. 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), Paris, France*, 12–15 December 2022. Paris, 2022. <https://doi.org/10.1109/FMEC57183.2022.10062753>.

5. Sidorenko A. V., Prihodko I. A. *The quantum of distribution keys in quantum cryptography*. Voennaja bezopasnost' gosudarstva v sovremennyh uslovijah: tezisy dokladov Mezhdunarodnoj voenno-nauchnoj konferencii uchrezhdenija obrazovanija «Voennaja akademija Respubliki Belarus'», Minsk, 24–25 aprelja 2024 g. [The Military of State Safety in Modern Conditions: Abstracts of Reports of International Military-sciensies Conference of "Military Academy of Belarus", Minsk, 24–25 April 2024]. Minsk, Voennaja akademija Respubliki Belarus', 2024, p. 535 (In Russ.).

6. Nguyen G. T., Kim K. A survey about consensus algorithm used in Blockchain. *Journal of Information Processing Systems*, 2018, vol. 14, pp. 101–128.

7. Bouwmeester D., Ekert A., Zeilinger A. (eds.). *The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation*. Berlin, Springer, 2000, 350 p.

8. Artur K., Ekert A. A quantum cryptography based on Bell's theorem. *Physical Review*, 1991, vol. 67, pp. 661–663.

9. Prihodko I. A. *The computer program for quantum of distribution keys*. Materialy XIII Mezhvuzovskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii kursantov i magistrantov fakul'teta svjazi i avtomatizirovannyh sistem upravlenija, Minsk, 22 maja 2024 g. [The Materials of XIII Young Science-technical Conference of Military Students and Magistrants of Connection and Automatic System of Management Faculty, Minsk, 22 May 2024]. Minsk, Voennaja akademija Respubliki Belarus', 2024, p. 22 (In Russ.).

10. Sidorenko A. V., Prihodko I. A. *The quantum of distribution keys and algorithms of consensus for quantum encryption*. Tehnicheskie sredstva zashhity informacii: materialy XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 8 ijunja 2025 g. [*The Technical Means of Information Defence: Materials of XXIII International Science-technical Conference, Minsk, 8 July 2025*]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2025, p. 289–292 (In Russ.).

Информация об авторах

Сидоренко Алевтина Васильевна, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет.

E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Приходько Иван Андреевич, студент, Белорусский государственный университет.

E-mail: prikhodko@bsu.by

Information about the authors

Alevtina V. Sidorenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University.

E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Ivan A. Prikhodko, Student, Belarusian State University.

E-mail: prikhodko@bsu.by

ИНФОРМАЦИЯ

INFORMATION



V Международный форум IT-Академграда «Искусственный интеллект в Беларуси»

Масштабная выставка-презентация разработок в области искусственного интеллекта.

Деловая программа по тематическим секциям:

современное состояние и перспективы развития технологий искусственного интеллекта; подготовка специалистов и развитие компетенций для экономики, ориентированной на искусственный интеллект; применение искусственного интеллекта в отраслях экономики Беларуси – промышленности, транспорте, медицине, образовании, государственном управлении; развитие национальных языковых моделей и систем интеллектуальной обработки данных; международные исследовательские инициативы и совместные проекты в рамках научных союзов и отраслевых альянсов.

Работа диалоговой площадки, которая объединяет экспертное сообщество, формирует стратегические подходы и обеспечивает обмен практическими результатами в сфере искусственного интеллекта, включает обсуждение новых вызовов, возможностей и практических результатов в сфере нейросетей.

Подведение итогов открытого конкурса «Лидеры искусственного интеллекта в Беларуси».

Организатор:

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (<https://uiip.by/rus/actions/conferences/>).

Место и время проведения:

ОИПИ НАН Беларуси (Минск, ул. Сурганова, 6).
13–14 октября 2026 г.

Регистрация по ссылке:

<https://uiip.by/forumit/registration/>.

Контакты:

interdep@newman.bas-net.by.

**XXV Международная
научно-техническая конференция
«Развитие информатизации и государственной
системы научно-технической информации»
(РИНТИ-2026)**

Направления конференции:

Развитие основных направлений и технологий цифровой трансформации: электронное государство, цифровая экономика, электронная торговля и логистика, электронное обучение, электронное здравоохранение, электронные библиотеки, оцифровка культурного наследия, формирование национального электронного контента.

Разработка и внедрение корпоративных систем научно-технической информации, библиотечно-информационных систем и технологий для автоматизации информационного обеспечения научной, научно-технической и инновационной деятельности. Публикационная активность ученых и организаций.

Региональная информатизация и информационная инфраструктура. Информационная поддержка науки и образования на основе современных информационно-телекоммуникационных технологий, организации единого научно-информационного пространства.

Формирование нормативно-правовой базы, интегрированной системы стандартизации (унификации), сертификации, экспертизы, оценки эффективности реализации программ и проектов в области информатизации и систем научно-технической информации.

Анализ состояния и проблем развития единого информационного пространства, методы и средства обеспечения его формирования, использования и развития в интересах граждан, общества и государства.

Исследование процессов цифровизации экономики и общества.

Искусственный интеллект и когнитивные технологии в информатизации.

Организаторы:

Национальная академия наук Беларуси,
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь,
Белорусский государственный университет,
Национальная библиотека Беларуси.

Место и время проведения:

ОИПИ НАН Беларуси (Минск, ул. Сурганова, 6).
19 ноября 2026 г.

Форма участия:

Очная (пленарный или секционный доклад), заочная.

Для участия в конференции необходимо:

зарегистрироваться на сайте <http://opac.bas-net.by/opacpage/rinti/reg.php>,

отправить доклад по электронной почте vengerov@basnet.by.

Информационное письмо и другая информация о конференции

представлены на сайте <http://opac.bas-net.by/opacpage/rinti/>.

Ответственное лицо за прием материалов

Венгеров Виктор Николаевич +(375 17) 270-22-08.

Приглашаются принять участие представители белорусских и зарубежных организаций, научные работники, профессорско-преподавательский состав организаций и вузов, сотрудники библиотек, аспиранты, специалисты в области цифровизации и искусственного интеллекта.

По итогам конференции планируется выпуск сборника научных докладов.

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 подписочных 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 подписочной 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

2 | 2026

ТОМ ■ VOL. 23

ИНФОРМАТИКА ■ INFORMATICS

ISSN 1816-0301 (Print)



9 771816 030000