

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ

Том 32, № 2, 2026

Научный журнал издается с 1995 года

Учредитель

Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Журнал включен в базы данных:

DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, РИНЦ и другие

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЕ

- Босько О. В.** Цифровой потенциал и прикладные инструменты упрощения торговли: опыт сравнительного анализа глобальных индексов 5
- Калиновская И. Н.** Электронный геном компетенций: анализ профессионального профиля сотрудника организации на основе блокчейна и искусственного интеллекта 12
- Куган С. Ф., Воронина А. М.** Применение экономико-математического инструментария в сфере информационной безопасности объектов логистической инфраструктуры 22

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Зельманский О. Б., Богуш В. А.** Обеспечение защиты медицинских данных пациентов в биотехнических системах..... 28
- Тимошкевич И. В.** Обоснование разработки алгоритма создания компьютерной имитационной модели для оценки энергетической и экономической эффективности инженерных систем жилых зданий 35
- Клименко Д. М., Козлова Е. И.** Исследование влияния гиперпараметров на точность нейросетевого предсказания с использованием набора данных Fashion-MNIST 44

Главный редактор Вадим Анатольевич Богущ,
д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

Редакционная коллегия

Листопад Н. И., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь – заместитель главного редактора
Беляцкая Т. Н., д. э. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь – заместитель главного редактора
Певнева Н. А., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь – ответственный секретарь редакционной коллегии
Сафонов В. Г., д. ф.-м. н., профессор, Институт математики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
Байнев В. Ф., д. э. н., к. т. н., профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь
Ковалёв М. М., Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. ф.-м. н., профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь
Курбацкий А. Н., Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь
Хацкевич Г. А., д. э. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
Голенков В. В., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
Быков А. А., д. э. н., профессор, Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Республика Беларусь
Сирота А. А., чл.-корр. Международной академии информатизации, д. т. н., профессор, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация
Малинецкий Г. Г., д. ф.-м. н., профессор, Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
Глухов В. В., д. э. н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Плотников В. А., д. э. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Касумов В. А., д. т. н., профессор, Бакинский инженерный университет, г. Хырдалан, Азербайджанская Республика

Ответственный секретарь А. Л. Потеев

**Издание перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 10 июня 2022 г.
Регистрационный номер 662**

**Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертаций по следующим научным направлениям:
технические (информатика, вычислительная техника и управление) и экономические науки**

Подписано в печать 11.06.2026. Формат бумаги 60×84½. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 6,28. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 51 экз. Заказ 91.

Адрес редакции: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-41
dig.tr@bsuir.by; http://dt.bsuir.by

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
оригинал-макет, оформление, 2026

DIGITAL TRANSFORMATION

V. 32, No 2, 2026

The scientific journal is being published since 1995

Founder

Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”

The Journal is included in the following databases:
DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, RISC et. al.

CONTENTS

ECONOMIC SCIENCES, EDUCATION

- Bosko O.** Digital Potential and Applied Trade Facilitation Tools: A Comparative Analysis of Global Indices..... 5
- Kalinouskaya I.** The Electronic Genome of Competencies: Analyzing the Professional Profile of an Organization’s Employees Using Blockchain and Artificial Intelligence..... 12
- Kuhan S., Voronina A.** Application of Economic and Mathematical Tools in the Field of Information Security of Logistics Infrastructure Facilities..... 22

TECHNICAL SCIENCES

- Zelmanski O., Bogush V.** Ensuring the Protection of Patient Medical Data in Biotechnical Systems. 28
- Tsimashkevich I.** Justification for the Development of an Algorithm for Creating a Computer Simulation Model for Assessing the Energy and Economic Efficiency of Engineering Systems of Residential Buildings..... 35
- Klimenka D., Kazlova A.** Investigation of the Impact of Hyperparameters on the Accuracy of Neural Network Predictions Using the Fashion-MNIST Dataset..... 44

Editor-in-Chief Vadim A. Bogush, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,
Rector of the Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Editorial Board

- Nikolai I. Listopad**, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Deputy Chief Editor
- Tatiana N. Belyatskaya**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Deputy Chief Editor
- Natalia A. Pevneva**, Cand. Sci., (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Executive Secretary of the Editorial Board
- Vasily G. Safonov**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
- Valery F. Baynev**, Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
- Mikhail M. Kovalev**, Honored Scientist the Republic of Belarus, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
- Alexander N. Kurbatski**, Honored Scientist of the Republic of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus
- Gennady A. Khatskevich**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus
- Vladimir V. Golenkov**, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus
- Aleksei A. Bykov**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Belarus State Economic University, Minsk, Republic of Belarus
- Alexander A. Sirota**, Corresponding Member of International Informatization Academy, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation
- Georgiy G. Malinetskiy**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
- Vladimir V. Glukhov**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation
- Vladimir A. Plotnikov**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russian Federation
- Vagif A. Gasimov**, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Baku Engineering University, Khirdalan, Republic of Azerbaijan

Responsible Secretary A. Patseyeu

**Publication is re-registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2022, June, 10th
Reg. No 662**

Signed for printing 11.06.2026. Format 60×84 ¼. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. l. 6,28. Ed.-ed. l. 4,5. Edition 51 copies. Order 91.

Address

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P. Brovki St., 220013, Minsk
Tel.: +375 17 293-88-41
dig.tr@bsuir.by; <http://dt.bsuir.by>

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.
6, P. Brovki St., 220013, Minsk



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-5-11>

УДК 339.5:004.9

ЦИФРОВОЙ ПОТЕНЦИАЛ И ПРИКЛАДНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ УПРОЩЕНИЯ ТОРГОВЛИ: ОПЫТ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ГЛОБАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ

О. В. БОСЬКО

Институт экономики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексной оценки цифровой трансформации внешнеэкономической деятельности. В существующих подходах отсутствует сопоставление ресурсного потенциала и эффективности его использования. Для его обеспечения в статье рассмотрено совместное применение двух метрик: индекса сетевой готовности и глобального исследования ООН по упрощению процедур торговли. Их интегральное использование на основе сопоставительного анализа позволяет рассматривать цифровую трансформацию внешнеэкономической деятельности как результат взаимодействия технологического развития и специализированных институциональных реформ. Результаты исследования позволяют провести типологизацию стран, а также свидетельствуют, что высокий индекс сетевой готовности является необходимым, но недостаточным условием цифровизации внешнеэкономических связей. Оптимальная модель цифровизации внешнеэкономической деятельности предполагает сбалансированное развитие двух направлений: скорость модернизации нормативно-правовой базы должна коррелировать с темпом технологического прогресса, обеспечивая легитимность и безопасность международного торгового взаимодействия. Это диктует переход от политики цифрового насыщения к политике регуляторной открытости и стандартизации.

Ключевые слова: цифровая трансформация, внешнеэкономическая деятельность, торговое взаимодействие, индекс сетевой готовности, упрощение процедур торговли, трансграничный обмен данными, институциональные барьеры.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Босько, О. В. Цифровой потенциал и прикладные инструменты упрощения торговли: опыт сравнительного анализа глобальных индексов / О. В. Босько // Цифровая трансформация. 2026. Т. 32, № 2. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-5-11>.

DIGITAL POTENTIAL AND APPLIED TRADE FACILITATION TOOLS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF GLOBAL INDICES

OLGA BOSKO

The Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The relevance of this study stems from the need for a comprehensive assessment of the digital transformation of foreign economic activity. Existing approaches lack a comparison of resource potential and the effectiveness of its use. To achieve this, this article examines the combined application of two metrics: the Network Readiness Index and the UN Global Trade Facilitation Study. Their integrated use, based on comparative analysis, allows us to view the digital transformation of foreign economic activity as the result of the interaction between technological development and specialized institutional reforms. The study's results allow for a classification of countries and demonstrate that a high network readiness index is a necessary but not sufficient condition for the digitalization of foreign economic relations. An optimal model for the digitalization of foreign economic activity presupposes a balanced development of both areas: the rate of modernization of the regulatory framework should correlate with the pace of technological progress, ensuring the legitimacy and security of international trade interactions. This dictates a transition from a policy of digital saturation to a policy of regulatory openness and standardization.

Keywords: digital transformation, foreign economic activity, trade interaction, network readiness index, trade facilitation, cross-border data exchange, institutional barriers.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interests.

For citation. Bosko O. (2026) Digital Potential and Applied Trade Facilitation Tools: A Comparative Analysis of Global Indices. *Digital Transformation*. 32 (2), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-5-11> (in Russian).

Введение

Одним из ключевых трендов глобального экономического развития является цифровая трансформация внешнеэкономической деятельности, которая предполагает переход от разрозненного бумажного документооборота к единым экосистемам, использующим искусственный интеллект (ИИ), облачные решения и аналитику больших данных для управления поставками. Однако масштаб и глубина этого перехода в разных странах существенно отличаются, а применяемые подходы к оценке цифровизации внешнеэкономической деятельности часто носят фрагментарный характер.

Для объективной оценки достижений, сопоставления результатов разных стран и выявления проблемных аспектов необходим надежный аналитический инструментарий. Для данного исследования были выбраны индекс сетевой готовности (Network Readiness Index, NRI) [1] и глобальное исследование ООН по вопросам упрощения процедур торговли с использованием цифровых и устойчивых технологий (UN Global Survey on Digital and Sustainable Trade Facilitation, UNTFS) [2]. Связь между этими индексами носит взаимодополняющий характер: если NRI отражает технологическую оснащенность и общую зрелость цифровой экосистемы, то UNTFS оценивает эффективность применения имеющихся технологий для цифровизации сферы внешней торговли. Их комплексное использование позволяет рассматривать цифровую трансформацию внешнеэкономической деятельности как результат взаимодействия общего технологического развития и специализированных реформ в области упрощения процедур торговли.

Сопоставительный анализ глобальных показателей

NRI – это комплексный показатель, характеризующий уровень развития информационно-коммуникационных технологий и сетевой экономики в странах мира [1]. В настоящее время его составляет Институт Портуланса (Portulans Institute) – американская неправительственная организация, которая проводит данное исследование в партнерстве с Всемирным альянсом информационных технологий и услуг (World Information Technology and Services Alliance). «В целях исследования условий развития стран в сфере глобальной цифровой трансформации данный индекс является одним из авторитетных. В структуре стран цифровизация принимает роль двигателя экономического развития и дает возможность достижения весомых экономических сдвигов. Данный индекс может и должен быть использован для осуществления мониторинга в области развития информационного общества» [3, С. 62].

NRI строится на четырех основных субиндексах.

1. Технологии (Technology): оценка доступности коммуникационной инфраструктуры, исследование контента и степени внедрения новых технологических парадигм, включая ИИ, интернет вещей и другие технологии.

2. Люди (People): оцениваются навыки применения информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в трех аспектах: отдельные лица, предприятия и государственный сектор.

3. Управление (Governance): особое внимание уделяется созданию и доступности структур, которые стимулируют развитие сетевой экономики по трем направлениям: доверие (безопасность и надежность), регулирование и инклюзивность (выявление цифрового неравенства).

4. Влияние (Impact): направлено на оценку разнообразных последствий участия в сетевой экономике в трех областях: экономика, качество жизни, вклад в достижение целей устойчивого развития [1].

Традиционно верхние строчки NRI занимают США, Сингапур и страны Северной Европы (Финляндия, Дания, Швеция). Значимым фактором конкурентоспособности стран во внешнеэкономической деятельности является техническая оснащенность (инфраструктура, доступ к облачным вычислениям и ИИ). Оценка степени цифровизации торговых операций в наибольшей

степени коррелирует с субиндексом рейтинга NRI «Технологии» (совокупный балл данного рейтинга включает также социальные и институциональные параметры). Страны-лидеры рейтинга по субиндексу «Технологии» представлены в табл. 1.

Таблица 1. Страны-лидеры рейтинга NRI по субиндексу «Технологии»

Table 1. Top-ranked countries in the NRI “Technology” sub-index

Страна	Показатель по субиндексу «Технологии»	Общий показатель NRI	Место в общем рейтинге NRI
США	82,47	79,13	1
Швейцария	73,60	73,63	9
Нидерланды	72,01	75,08	6
Сингапур	70,42	75,46	3
Германия	70,27	74,12	7
Швеция	69,04	75,09	5
Великобритания	67,74	73,85	8
Дания	67,47	75,14	4
Финляндия	66,28	75,82	2
Республика Корея	66,07	72,38	10

Для сравнения следует отметить, что замыкает рейтинг NRI Республика Бурунди (государство в Восточной Африке), которая занимает 127-е место с общим показателем NRI = 14,76 и показателем по субиндексу «Технологии», равным 11,88 [1]. Республика Беларусь в данном рейтинге не представлена, что обусловлено сочетанием методологических факторов и имеющихся нюансов с предоставлением данных. Однако, несмотря на отсутствие в NRI, Беларусь активно участвует в других профильных рейтингах. Например, в индексе развития ИКТ (IDI) [4], который оценивает прогресс в направлении универсальных и значимых соединений – создание для каждого возможности выходить в интернет в оптимальных условиях по доступной цене в любом месте и в любое время. В соответствии с данным рейтингом, который публикует Международный союз электросвязи, Беларусь традиционно входит в число лидеров региона СНГ и Европы. В 2025 г. итоговый балл республики – 90,7, что соответствует 46-й строке из 164-х.

Инструментом мониторинга того, как цифровизация и принципы устойчивого развития меняют трансграничную торговлю, является UNTFIS [2], которое совместно проводят региональные комиссии ООН и ЮНКТАД. Исследование проводится каждые два года и в настоящее время охватывает более 180 стран мира и 62 меры по цифровому и устойчивому упрощению торговых процедур. Показатели, используемые при изучении упрощения торговых процедур и безбумажной торговли, сгруппированы в пять ключевых категорий:

- 1) прозрачность (transparency): публикация правил импорта/экспорта в интернете, наличие справочных служб;
- 2) формальности (formalities): упрощение документооборота, подача деклараций до прибытия груза, применение систем управления рисками;
- 3) институциональные структуры и сотрудничество (institutional arrangement and cooperation): работа национальных комитетов по упрощению процедур торговли и координация между пограничными ведомствами;
- 4) безбумажная торговля (paperless trade): наличие систем единого окна, электронная подача таможенных деклараций, электронные платежи пошлин;
- 5) трансграничная безбумажная торговля (cross-border paperless trade): наличие электронного обмена сертификатами происхождения, фитосанитарными сертификатами и взаимное признание электронных подписей между странами [2].

Из перечисленных групп непосредственное отношение к цифровому упрощению торговых процедур имеют безбумажная торговля (включает меры по замене традиционной бумажной документации электронными системами) и трансграничная безбумажная торговля (предполагает создание правовых механизмов и технических решений, необходимых для межстранового обмена документами в электронном формате и их взаимного признания).

В соответствии с рассматриваемым исследованием ООН глобальный уровень внедрения мер по безбумажной торговле составляет 71 %, при этом наблюдаются значительные различия по регионам: развитые экономики лидируют с показателем внедрения 89 %, острова Тихого океана демонстрируют уровень в 36 %. Разница в 53 процентных пункта между лучшим и худшим показателями подчеркивает неравномерность прогресса в регионах. Глобальный уровень реализации мер по трансграничной безбумажной торговле составляет 49 %, развитые экономики демонстрируют показатель 67 %, острова Тихого океана – 21 %. Разница между регионами с лучшими и худшими показателями составляет 46 процентных пунктов, при этом общий уровень реализации мер по внедрению трансграничной безбумажной торговли остается достаточно невысоким из-за юридических сложностей с признанием документов между странами.

Таким образом, во всех странах мира цифровая трансформация внутренних торговых процессов (paperless trade) протекает значительно быстрее, чем внедрение механизмов трансграничного обмена данными (cross-border paperless trade). Это связано с недостаточной проработанностью нормативной базы. Отсутствие взаимного признания электронных стандартов и подписей не позволяет сформировать бесшовные логистические цепочки.

В 2025 г. общий средний глобальный уровень внедрения мер по упрощению процедур торговли с использованием цифровых и устойчивых технологий (в совокупности по всем изучаемым ключевым категориям) превысил 70 % и вырос по сравнению с 2023-м, когда он составлял 68,6 %. Развитые экономики по-прежнему демонстрируют высокие баллы (например, Сингапур и Корея по уровню безбумажной торговли достигли 100 %), при этом самую высокую динамику роста показывают страны СНГ и Юго-Восточной Азии.

Республика Беларусь опережает многие страны региона по ряду ключевых направлений и демонстрирует значительный прогресс в цифровизации. Динамика общего показателя и субиндексов упрощения процедур торговли с использованием цифровых и устойчивых технологий в Беларуси за 2023 и 2025 гг. [5] в соответствии с глобальным исследованием ООН представлена в табл. 2.

Таблица 2. Динамика общего показателя и субиндексов упрощения процедур торговли по годам
Table 2. Dynamics of the overall trade facilitation indicator and sub-indices by year

Показатель	2023 г.	2025 г.
Упрощение торговых процедур, %	72,04	78,49
Прозрачность, %	86,67	93,33
Формальность, %	75,00	83,33
Институциональные структуры и сотрудничество, %	77,78	88,89
Безбумажная торговля, %	70,37	70,37
Трансграничная безбумажная торговля, %	55,56	66,67

Важно отметить, что в Беларуси практически по всем изучаемым UNTFS показателям присутствует положительная динамика, уровень внедрения мер по безбумажной торговле соответствует глобальному, а по трансграничной безбумажной торговле превышает его. По уровню развития трансграничной безбумажной торговли республика опережает своего главного партнера – Российскую Федерацию, где этот показатель составляет 55,56 %. Обе страны активно развиваются в данном направлении. Так, в 2024 г. во взаимодействии с российскими партнерами был внедрен трансграничный обмен электронными товарными накладными с использованием механизма доверенной третьей стороны. Пилотный проект по трансграничному электронному документообороту (ТЭДО) реализован белорусским производителем трикотажной одежды Mark Formelle [6].

С другими странами ЕАЭК пока чаще используется гибридная модель: для налоговых служб данные передаются в электронном виде, а коммерческие документы (договоры, акты) часто дублируются на бумаге из-за сложностей с взаимным признанием электронных цифровых подписей. Только с Казахстаном началось внедрение прямых систем ТЭДО через национальных операторов. С Китаем цифровое взаимодействие находится на начальном этапе: подписаны межправительственные соглашения об упрощении процедур торговли (включая торговлю услугами), но «бесшовный» обмен накладными еще не реализован. В основном используется цифровое подтверждение сделок через биржевые площадки.

Результаты исследования

Как показал проведенный сравнительный анализ рассматриваемых индексов, несмотря на глобальный характер цифровизации внешнеторговых связей, ее степень существенно отличается от региона к региону. Сопоставление показателей общего уровня цифровизации (по индексу NRI) и практических достижений в сфере упрощения торговли (по данным UNTFS) позволяет выделить четыре группы стран.

1. Страны с высоким уровнем инфраструктуры и практически полной автоматизацией торговых процессов, которые можно назвать лидерами цифровой трансформации: занимают первые 10 мест мирового рейтинга NRI, уровень внедрения цифровых и устойчивых технологий превышает 85–90 %. К этой группе можно отнести США (1-е место в NRI, UNTFS – 91,4 %), Финляндию (2-е место в NRI, UNTFS – 90,32 %), Сингапур (3-е место в NRI, UNTFS – 96,77 %), Швецию (5-е место в NRI, UNTFS – 88,17 %), Нидерланды (6-е место в NRI, UNTFS – 97,85 %), Республику Корея (10-е место в NRI, UNTFS – 94,62 %).

2. Страны с развивающейся цифровой средой, которые активно внедряют торговые инновации: занимают достаточно высокие места в рейтинге NRI (характеризуются высоким качеством связи и развитыми IT-сервисами), при этом имеют средние показатели UNTFS, связанные с существующими особенностями в сфере государственного регулирования торговли. К этой группе можно отнести Китай (24-е место в NRI, UNTFS – 92,47 %), Индию (45-е место в NRI, UNTFS – 93,55 %), Малайзию (38-е место в NRI, UNTFS – 90,32 %), Таиланд (44-е место в NRI, UNTFS – 88,17 %), Вьетнам (40-е место в NRI, UNTFS – 77,42 %).

3. Страны, прилагающие значительные усилия для цифровизации торговли: имеют средний или невысокий индекс NRI (занимают позиции ниже 50-го места), однако, несмотря на это, в использовании цифровых и устойчивых технологий они добились определенных успехов, пока преимущественно внутри страны. Сюда относятся страны Латинской Америки, регион СНГ, Центрально-Азиатский регион: например, Бразилия (51-е место в NRI, UNTFS – 81,72 %), Мексика (67-е место в NRI, UNTFS – 79,57 %), Российская Федерация (56-е место в NRI, UNTFS – 87,1 %), Казахстан (65-е место в NRI, UNTFS – 76,34 %).

4. Страны, сталкивающиеся с инфраструктурными барьерами: требуется проведение комплексной работы, направленной как на развитие базовой инфраструктуры (связь, кадры), так и на создание правовых условий для упрощения процедур торговли. В рейтинге NRI страны этой группы занимают позиции ниже 80-го места и имеют самые низкие показатели внедрения цифровых технологий. Это такие страны Африки, как Республика Мали (120-е место в NRI, UNTFS – 34,41 %), Буркина Фасо (121-е место в NRI, UNTFS – 46,24 %), Республика Ангола (125-е место в NRI, UNTFS – 58,06 %). Островные государства Тихого океана не представлены в NRI, в том числе по причине отсутствия ресурсов для сбора необходимых данных, тем не менее, основываясь на данных UNTFS, их также можно отнести к данной группе.

Что касается Республики Беларусь, то ее уровень цифровизации превышает среднемировые значения и соответствует лидерским позициям в регионе СНГ. Уровень внедрения мер по упрощению процедур торговли с использованием цифровых и устойчивых технологий составляет 78,49 %. Совокупность этих данных позволяет в предложенной в статье классификации отнести Беларусь к категории лидеров в третьей группе стран: уровень технического оснащения обеспечивает необходимые условия для цифровизации внешнеторговой деятельности, однако присутствуют регуляторные барьеры, которые диктуют необходимость гармонизации национальных стандартов с международными нормами обмена данными. Для перехода республики во вторую группу стран необходимо продолжить работу по повышению уровня внедрения цифровых технологий и минимизации регуляторных барьеров. Первоочередными мерами, направленными на формирование благоприятной среды для цифровизации белорусских внешнеторговых связей, могут стать:

- законодательное закрепление приоритета электронного документооборота и исключение дублирования документов на бумажных носителях в рамках межведомственного взаимодействия;
- развитие национальной системы «Единое окно» (single window), которая создаст принципиально новую архитектуру взаимодействия бизнеса и государства. Определенные шаги в данном направлении уже сделаны: с 30 декабря 2025 г. в Республике Беларусь функционирует элект-

ронная платформа «Одно окно ВЭД» (<https://export.by/single-window/>), которая предоставляет бизнесу информацию, необходимую для международной торговли: пошагово излагает алгоритм действий экспортера, содержит информацию о системе государственной поддержки экспорта и его продвижении, предлагает доступ к информации о международных базах данных внешней торговли и др. Пользователям предоставляется полная информация по более чем 200 административным процедурам, охватывающим 21 министерство и ведомство, которые выступают в качестве регулирующего органа. Предусмотрена возможность осуществить прямой переход на соответствующий цифровой сервис, в частности «Е-Паслуга», если данная процедура оцифрована. По административным процедурам, которые пока требуют офлайн-взаимодействия, даются четкие пошаговые инструкции [7]. Однако документы по-прежнему подаются в разные ведомства (вручную или через их порталы);

– масштабирование имеющегося опыта взаимного признания электронных цифровых подписей на все страны – члены ЕАЭС и Китай, что позволит осуществить поэтапный переход от локальных решений к полноценной интеграции Беларуси в глобальные цифровые транспортные системы.

Заключение

1. Использование при анализе двух индексов позволяет разграничить барьеры развития: если индекс сетевой готовности акцентирует внимание на дефиците ресурсов (капитала, навыков), то глобальный обзор ООН по упрощению цифровой торговли концентрируется на административных и правовых ограничениях.

2. Высокие показатели развития информационно-коммуникационных технологий являются необходимым, но недостаточным условием для цифровизации внешнеэкономических связей. Успешная реализация имеющегося потенциала напрямую зависит от эффективности его использования при упрощении торговых процедур и внедрении безбумажной торговли. После обеспечения достаточно высокого уровня цифровизации институциональное регулирование внешне-торговой деятельности становится более важным, чем дополнительное техническое оснащение. Стратегическое развитие внешней торговли обуславливает необходимость перехода от политики цифрового насыщения к политике регуляторной открытости и стандартизации.

3. Республика Беларусь входит в число лидеров среди стран СНГ по цифровизации, что создает необходимые условия для перехода к электронному формату трансграничного взаимодействия. Однако успех в международной торговле зависит не только от технологий, но и от качества институциональной среды, где в настоящее время и заложен потенциал для роста.

4. Комплексная оценка цифровой трансформации внешнеэкономических связей требует сопоставления ресурсного потенциала и прикладных механизмов его реализации. Синтез данных индекса сетевой готовности и глобального обзора ООН по упрощению цифровой торговли позволяет сформировать объективное представление о состоянии цифровой экосистемы и выявить структурные закономерности ее развития. Оптимальная модель цифровизации внешнеэкономических связей предполагает сбалансированное развитие обоих направлений. Устойчивый рост трансграничного торгового оборота в цифровой экономике возможен лишь при условии корреляции между темпами технологического прогресса и скоростью модернизации нормативно-правовой базы, обеспечивающей легитимность и безопасность международного торгового взаимодействия.

Список литературы

1. Network Readiness Index 2025 [Electronic resource]. Mode of access: <https://networkreadinessindex.org/>. Date of access: 05.05.2026.
2. Trade Facilitation and Paperless Trade (2025) [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.untfsurvey.org/world>. Date of access: 05.05.2026.
3. Головенчик, Г. Г. Цифровая глобализация: мировые тренды, влияние на рост и интернационализацию национальных экономик / Г. Г. Головенчик, М. М. Ковалев // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2025. Т. 33, № 3. С. 357–381.
4. Measuring Digital Development – ICT Development Index 2025 [Electronic resource]. Mode of access: https://www.itu.int/hub/publication/D-IND-ICT_MDD-2025-1/. Date of access: 05.05.2026.

5. Belarus. Trade Facilitation and Paperless Trade in Belarus [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.untfsurvey.org/economy?id=BLR>. Date of access: 05.05.2026.
6. Как обмениваться документами с белорусским бизнесом в 2025 году: три кейса внедрения ТЭДО [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://secrets.tbank.ru/blogi-kompanij/blogi-kompanij-tedo-2025/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F. Дата доступа: 05.05.2026.
7. Запуск платформы «Одно окно ВЭД» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bsca.by/ru/novosti/zapusk-platformy-odno-okno-ved>. Дата доступа: 05.05.2026.

Поступила 08.05.2026

Принята в печать 02.06.2026

Доступна на сайте 10.07.2026

References

1. *Network Readiness Index 2025*. Available: <https://networkreadinessindex.org/> (Accessed 5 May 2026).
2. *Trade Facilitation and Paperless Trade (2025)*. Available: <https://www.untfsurvey.org/world> (Accessed 5 May 2026).
3. Golovenchik G. G., Kovalev M. M. (2025) Digital Globalization: Global Trends, Impact on Growth and Internationalization of National Economies. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series Economics*. 33 (3), 357–381 (in Russian).
4. *Measuring Digital Development – ICT Development Index 2025*. Available: https://www.itu.int/hub/publication/D-IND-ICT_MDD-2025-1/ (Accessed 5 May 2026).
5. Belarus. Trade Facilitation and Paperless Trade in Belarus. Available: <https://www.untfsurvey.org/economy?id=BLR> (Accessed 5 May 2026).
6. *How to Exchange Documents with Belarusian Businesses in 2025: Three Cases of TEDO Implementation*. Available: https://secrets.tbank.ru/blogi-kompanij/blogi-kompanij-tedo-2025/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (Accessed 5 May 2026) (in Russian).
7. *Launch of the “One-Stop Shop for Foreign Economic Activity” Platform*. Available: <https://www.bsca.by/ru/novosti/zapusk-platformy-odno-okno-ved> (Accessed 5 May 2026) (in Russian).

Received: 8 May 2026

Accepted: 2 June 2026

Available on the website: 10 July 2026

Сведения об авторе

Босько О. В., канд. филол. наук, вед. науч. сотр.,
Институт экономики Национальной академии наук
Беларуси

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. Сурганова, 1, корп. 2
Институт экономики
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 29 312-67-21
E-mail: o_bosko@mail.ru
Босько Ольга Владимировна

Information about the author

Bosko O., Cand. Sci. (Philol.), Leading Researcher,
The Institute of Economics of the National Academy
of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Surganova St., 1, Build. 2
The Institute of Economics
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 29 312-67-21
E-mail: o_bosko@mail.ru
Bosko Olga



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-12-21>

УДК 331.108.26:004.056

ЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНОМ КОМПЕТЕНЦИЙ: АНАЛИЗ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СОТРУДНИКА ОРГАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ БЛОКЧЕЙНА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

И. Н. КАЛИНОВСКАЯ

Витебский государственный технологический университет (Витебск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье представлено технико-экономическое обоснование применения электронного генома компетенций как инновационного решения для углубленного анализа профессионального профиля работников с интеграцией искусственного интеллекта. Актуальность исследования обусловлена необходимостью объективной оценки не только формальных квалификаций, но и доказательств их практического применения при подборе специалистов на ключевые позиции в условиях цифровизации экономики Республики Беларусь. Методология исследования включала сравнительный технико-экономический анализ традиционных и инновационных решений оценки кандидатов, метод экспертных оценок для определения временных и стоимостных параметров, расчет показателей экономической эффективности с учетом прямых и косвенных эффектов, моделирование бизнес-процессов углубленной оценки кандидатов.

Ключевые слова: электронный геном компетенций, искусственный интеллект, блокчейн-технология, оценка профессионального потенциала, человеческий ресурс.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Калиновская, И. Н. Электронный геном компетенций: анализ профессионального профиля сотрудника организации на основе блокчейна и искусственного интеллекта / И. Н. Калиновская // Цифровая трансформация. 2026. Т. 32, № 2. С. 12–21. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-12-21>.

THE ELECTRONIC GENOME OF COMPETENCIES: ANALYZING THE PROFESSIONAL PROFILE OF AN ORGANIZATION'S EMPLOYEES USING BLOCKCHAIN AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

IRYNA KALINOUSKAYA

Vitebsk State University of Technology (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. This article presents a feasibility study for the use of an electronic competency genome as an innovative solution for in-depth analysis of employee professional profiles, integrating artificial intelligence. The relevance of the study stems from the need for an objective assessment of not only formal qualifications but also evidence of their practical application in the selection of specialists for key positions in the context of the digitalization of the Belarusian economy. The research methodology included a comparative feasibility study of traditional and innovative candidate assessment solutions, an expert assessment method for determining time and cost parameters, the calculation of economic performance indicators taking into account direct and indirect effects, and business process modeling for in-depth candidate assessment.

Keywords: electronic genome of competencies, artificial intelligence, blockchain technology, assessment of professional potential, human resources.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interests.

For citation. Kalinouskaya I. (2026) The Electronic Genome of Competencies: Analyzing the Professional Profile of an Organization's Employees Using Blockchain and Artificial Intelligence. *Digital Transformation*. 32 (2), 12–21. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-12-21> (in Russian).

Введение

В условиях ускоренной цифровой трансформации экономики Республики Беларусь возрастает значимость объективной оценки профессиональных компетенций работников, особенно при подборе специалистов на ключевые позиции. Традиционные подходы к верификации квалификаций, основанные на проверке дипломов и сертификатов, не предоставляют информации о практическом применении полученных знаний и навыков, что создает существенные риски при найме на должности, требующие высокой квалификации.

Результаты анализа компетенций на региональном рынке труда Республики Беларусь с применением больших языковых моделей демонстрируют наличие устойчивых кластеров взаимодополняющих компетенций для различных профессиональных групп [1]. Однако выявление этих компетенций на уровне конкретного работника требует объективных доказательств их практического применения, что невозможно обеспечить традиционными методами верификации квалификаций. Существующие системы оценки кандидатов на ключевые позиции характеризуются следующими недостатками: высокая трудоемкость проверки фактического опыта работы (требуется 5–7 рабочих дней на углубленную оценку одного кандидата); субъективность оценки при отсутствии структурированных данных о результатах применения компетенций; невозможность объективного сопоставления квалификации различных кандидатов из-за несопоставимости форматов представления информации; отсутствие механизмов автоматизированного анализа профессионального потенциала для формирования траекторий развития.

Применение блокчейн-технологий для верификации образовательных достижений демонстрирует перспективность децентрализованных систем учета квалификаций [2–5]. Однако существующие решения ориентированы преимущественно на хранение информации о полученных дипломах и сертификатах, не включая доказательства практического применения компетенций в профессиональной деятельности. В международной практике применяется концепция генома компетенций для структурного представления их и построения траекторий профессионального развития [6, 7]. Однако существующие объекты выполнены в виде онлайн-платформ без физического носителя и не обеспечивают криптографическую защиту данных о доказательствах применения компетенций.

Разработанная технология электронного генома компетенций (ЭГК) [8] представляет собой качественно новое решение, сочетающее портативный физический носитель информации, криптографическую защиту данных, структурированное хранение доказательств применения компетенций с автоматической оценкой их достоверности, интеграцию с системами искусственного интеллекта (ИИ) для анализа профессионального потенциала.

В статье приведено технико-экономическое обоснование применения технологии ЭГК [8] как инструмента углубленного анализа профессионального профиля работников при подборе на ключевые позиции и формировании систем управления талантами в организациях Беларуси. Выполнен сравнительный анализ существующих подходов к углубленной оценке профессиональных компетенций с выявлением их ограничений; дана детальная техническая характеристика ЭГК с обоснованием инновационных функциональных возможностей; определены оптимальные сценарии применения ЭГК для различных групп стейкхолдеров; рассчитаны показатели экономической эффективности внедрения технологии с учетом прямых и косвенных эффектов; обоснована возможность интеграции с системами ИИ для анализа профессионального потенциала.

Для выявления ограничений существующих подходов к углубленной оценке кандидатов применялся метод сравнительного анализа по глубине информации о практическом использовании компетенций, возможности объективной оценки достоверности информации и автоматизированного анализа профессионального потенциала, по трудоемкости процесса оценки. Временные затраты на углубленную оценку кандидатов определялись методом экспертных оценок с привлечением специалистов-практиков отделов кадров организаций Витебской области. При этом была сформирована экспертная группа из 12 специалистов со стажем работы в сфере управле-

ния персоналом не менее пяти лет, представляющих различные отрасли экономики: производственные предприятия (4 эксперта), учреждения образования (3 эксперта), организации сферы услуг (3 эксперта), государственные органы (2 эксперта). Согласованность оценок подтверждена коэффициентом конкордации Кендалла ($W = 0,78$). Расчет косвенных эффектов проводился с помощью оценки рисков ошибочного найма и упущенной выгоды от незакрытых вакансий на основе экспертных оценок вероятностей и средних стоимостных параметров. Моделирование бизнес-процессов углубленной оценки кандидатов выполнялось в нотации BPMN 2.0.

Техническая характеристика и применение разработанного решения

ЭГК [8] представляет собой смарт-карту стандартного формата ID-1 (85,60×53,98 мм) с энергонезависимой памятью 350 Кб, предназначенную для хранения и верификации информации о доказательствах практического применения компетенций в профессиональной деятельности. Карта содержит семь разделов информации:

- персональные данные владельца (фамилия, имя, отчество, фотография, уникальный идентификационный номер), защищенные персональным паролем;

- реестр компетенций – перечень до 200 компетенций с дополнительной информацией (сколько доказательств практического применения имеется по каждой компетенции, средняя оценка достоверности этих доказательств);

- доказательства практического применения компетенций – хранится до 500 детальных записей о том, как и где владелец применял свои компетенции на практике. Каждая запись содержит: что было сделано (описание задачи или проекта); где и когда это было сделано; кто подтверждает выполнение (работодатель, учреждение образования, профессиональная ассоциация и др.); какие результаты были достигнуты; какой уровень сложности задачи; электронная подпись организации, подтверждающей выполнение;

- автоматическая оценка достоверности доказательств – система автоматически рассчитывает, насколько можно доверять каждому доказательству, учитывая шесть факторов: тип доказательства (прямое подтверждение или косвенное); авторитетность организации, выдавшей подтверждение; возможность независимой проверки; сложность выполненной задачи; наличие измеримых результатов; актуальность. Каждому доказательству присваивается оценка от 0 до 100 баллов;

- утверждения о способностях – на основе накопленных доказательств система формирует до 40 утверждений о том, что владелец способен выполнять. Например, способен разработать и внедрить систему мотивации персонала для организации численностью до 500 человек с учетом отраслевой специфики. Для каждого утверждения указывается коэффициент уверенности (насколько надежно подтверждена эта способность доказательствами);

- база организаций-эмитентов – хранятся электронные подписи до 50 различных организаций пяти типов: работодатели, учреждения образования, сертификационные центры, профессиональные ассоциации, государственные органы. Это позволяет формировать комплексную доказательную базу компетенций из разных источников;

- данные для проверки подлинности (хеш-значения всех записей для сверки с распределенным реестром блокчейна, криптографические подписи, метаданные для аудита изменений).

ЭГК реализует четырехуровневую систему управления доступом, позволяющую владельцу гибко контролировать предоставление информации различным категориям пользователей:

- публичный режим – без авторизации показываются только общие сведения: количество доказательств, их типы, средние оценки достоверности. При этом конкретные детали не раскрываются;

- режим для проверенных организаций – после проверки, что запрос поступает от легитимной организации (например, потенциального работодателя), предоставляется дополнительная информация: названия организаций-эмитентов, общее описание контекста применения компетенций;

- режим полного доступа (с согласия владельца) – после ввода владельцем персонального пароля предоставляется полная информация: детальные описания всех доказательств, конкретные результаты, названия проектов;

- режим криптографической проверки с нулевым разглашением – специальный режим для ситуаций, когда нужно подтвердить соответствие определенным критериям без раскрытия деталей.

Например, подтвердить, что у владельца есть не менее трех доказательств применения компетенции «Управление проектами» с оценкой более 80 баллов, но не раскрывать, какие именно проекты он выполнял.

Важной способностью ЭГК является возможность экспорта структурированных данных для анализа системами ИИ. Структурированная организация данных в виде генома компетенций позволяет применять методы интеллектуального анализа для формирования комплексного профессионального профиля владельца. ЭГК содержит специальный интерфейс экспорта данных, который обеспечивает последовательную передачу структурированных записей о компетенциях и доказательствах их применения во внешние аналитические системы. После экспорта данных ИИ выполняет следующие задачи:

- на основе анализа совокупности доказательств применения компетенций определяет устойчивые модели профессионального поведения, типичные комбинации используемых компетенций, предпочтительные области применения навыков;
- анализирует, какие комбинации имеющихся компетенций с подтвержденными доказательствами применения являются достаточными для освоения новых видов профессиональной деятельности или должностей, для которых у владельца ранее не было опыта работы;
- для достижения целевых профессий или должностей определяет, каких именно компетенций не хватает владельцу, с учетом требуемого уровня владения и необходимости подтверждения практическим применением;
- на основе анализа связей между имеющимися доказательствами применения компетенций, весовых коэффициентов достоверности и утверждений о способностях формирует персонализированные рекомендации по оптимальным траекториям профессионального роста;
- оценивает потенциал владельца для успешной реализации в различных профессиональных ролях на основе количества, качества и разнообразия доказательств применения релевантных компетенций.

Принцип генома заключается в том, что комбинация доказанных компетенций, подобно комбинации генов в биологии, определяет потенциал для реализации различных профессиональных функций. При этом выявление оптимальных комбинаций и недостающих элементов осуществляется внешними аналитическими системами на основе экспортированных структурированных данных. Целевое назначение генома компетенций – углубленная оценка кандидатов на ключевые позиции, формирование индивидуальных траекторий профессионального развития, применение ИИ для анализа профессионального потенциала, системы управления талантами в крупных организациях. По своей сути ЭГК является логическим развитием концепции электронного паспорта компетенций [9, 10]. Ключевые отличия ЭГК от электронного паспорта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика электронного паспорта и электронного генома компетенций
Table 1. Comparative characteristics of the electronic passport and the electronic genome of competencies

Характеристика	Электронный паспорт	Электронный геном
Объем хранимой информации, Кб	64	350
Вид хранимой информации	Перечень подтвержденных компетенций	Перечень компетенций и доказательства их применения
Количество компетенций	До 300	До 200
Доказательство применения	Нет	До 500 детальных записей
Оценка достоверности	Нет	Автоматическая по 6 параметрам (0–100 баллов)
Утверждение о способностях	Нет	До 40 утверждений с коэффициентами уверенности
Интеграция с ИИ	Базовая (проверка наличия квалификаций)	Полная (анализ профессионального профиля, построение траекторий развития, выявление потенциала)

Окончание табл. 1
Ending of Tab. 1

Характеристика	Электронный паспорт	Электронный геном
Тип организаций-эмитентов	Только учреждения образования	5 типов: работодатели, учреждения образования, сертификационные центры, профессиональные ассоциации, госорганы
Режим доступа к данным	Базовый (открыт/закрыт)	4 режима с различными уровнями детализации
Возможность скрыть детали при проверке	Нет	Да (криптографические доказательства)
Уровень защиты от взлома	Высокий	Очень высокий
Основное применение	Массовая быстрая проверка квалификаций	Глубокий анализ профессионального профиля
Целевая аудитория	Все категории работников	Специалисты и руководители на ключевых позициях
Стоимость изготовления, руб.	25–40	40–60

Таким образом, электронный паспорт компетенций предназначен для быстрой массовой верификации наличия базовых квалификаций, в то время как ЭГК представляет собой инструмент углубленного анализа профессионального профиля с доказательствами практического применения компетенций и возможностью интеллектуального анализа для оценки потенциала и формирования траекторий развития. Возможность интеграции генома с ИИ создает качественно новые перспективы для управления человеческими ресурсами: от автоматизированного подбора кандидатов с учетом не только формальных квалификаций, но и доказанного опыта их применения, до формирования персонализированных программ профессионального развития на основе объективного анализа сильных сторон и потенциала развития работника.

ЭГК функционирует в рамках той же экосистемы, что и электронный паспорт (основные группы участников: владелец электронного паспорта/генома компетенций, государственные органы, центры выдачи и поддержки электронного паспорта/генома, потребители информации о квалификациях), однако предоставляет существенно расширенные возможности для углубленного анализа профессионального профиля работника. В рамках четырех основных групп участников экосистемы электронного паспорта для функционирования ЭГК важна дополнительная подгруппа – работодатели как источники доказательств применения компетенций. В отличие от электронного паспорта, где работодатели выступают только потребителями информации, в экосистеме ЭГК работодатели также становятся эмитентами данных о практическом применении компетенций работниками:

- подтверждение выполнения конкретных проектов и задач с применением определенных компетенций;
- предоставление информации о результатах применения компетенций (внедренные системы, достигнутые показатели, решенные проблемы);
- оценка уровня сложности выполненных задач и контекста применения компетенций;
- формирование криптографических подписей для доказательств применения компетенций.

Это создает качественно новую модель взаимодействия: работодатели не только считывают информацию о компетенциях при найме, но и пополняют ЭГК работников доказательствами их практического применения в процессе трудовой деятельности. Расширенная функциональность по сравнению с электронным паспортом заключается в хранении доказательств практического применения компетенций, весовой оценке достоверности доказательств имеющихся компетенций, формировании утверждений о способностях, многоуровневой системе управления доступом к информации, экспорте структурированных данных для анализа ИИ.

Определение сценария применения электронного паспорта и ЭГК позволяет организациям максимизировать экономический эффект от внедрения технологий цифровой верификации квалификаций. При этом возможно комбинированное использование обоих решений: электронного паспорта – для массовой верификации базовых квалификаций всех категорий персонала, ЭГК – для углубленной оценки кандидатов на ключевые позиции и формирования кадрового резерва.

Расчет экономической эффективности внедрения технологии

В ходе исследования проведен расчет экономической эффективности применения ЭГК для углубленной оценки кандидатов на ключевые позиции (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение затрат на углубленную оценку кандидатов на ключевые позиции
Table 2. Comparing the costs of in-depth assessments of candidates for key positions

Показатель	Традиционная система	ЭГК
Время оценки одного кандидата, дней	5	1,125
Количество кандидатов на одну позицию, чел.	4	4
Количество позиций в год	5	5
Общее время оценки, дней	100	22,5
Стоимость оценки (оплата труда), руб.	11 900	2678
Стоимость оборудования (годовая амортизация), руб.	–	100
Общие годовые затраты, руб.	11 900	2778
Экономия, руб. (%)	–	9122 (77)
Сокращение времени	–	В 4,4 раза

Помимо прямой экономии затрат на оплату труда специалистов отдела кадров, применение ЭГК обеспечивает существенные косвенные эффекты (табл. 3).

Таблица 3. Дополнительные косвенные эффекты для работодателей
Table 3. Additional indirect effects for employers

Эффект	Традиционная система	Система с электронным геномом	Экономия
Вероятность ошибочного найма на ключевые позиции, %	15–20	5–8	–
Потери от ошибочного найма (5 позиций в год), руб.	8750	3250	5500
Среднее время закрытия вакансии на ключевую позицию, дней	45	20	–
Упущенная выгода от незакрытой вакансии (5 позиций), руб.	67 500	30 000	37 500
Итого дополнительных эффектов, руб.	–	–	43 000

Анализ данных табл. 2, 3 показывает, что косвенные эффекты (43 тыс. руб.) почти в 5 раз превышают прямую экономию затрат на оплату труда (9,122 тыс. руб.), что подчеркивает стратегическую значимость технологии для повышения качества кадровых решений. Совокупный годовой экономический эффект для организации численностью от 100 человек при найме на пять ключевых позиций составляет: прямая экономия затрат на оценку компетенций – 9,122 тыс. руб.; снижение потерь от ошибочного найма – 5,5 тыс. руб.; экономия от ускорения закрытия вакансий – 37,5 тыс. руб.; итого – 52,122 тыс. руб. Сводные данные по экономической эффективности внедрения технологий цифровой верификации квалификаций (электронного паспорта и ЭГК) представлены в табл. 4.

Таблица 4. Сводные показатели экономической эффективности внедрения технологий цифровой верификации квалификаций
Table 4. Summary indicators of the economic efficiency of the introduction of digital verification technologies of qualifications

Стейкхолдер	Технология	Годовой экономический эффект, тыс. руб.	Сокращение времени	Снижение затрат, %
Работодатель, массовые позиции	Электронный паспорт	3,043	В 33 раза	94
Работодатель, ключевые позиции	ЭГК	9,122	В 4,4 раза	77

Окончание табл. 4
Ending of Tab. 4

Стейкхолдер	Технология	Годовой экономический эффект, тыс. руб.	Сокращение времени	Снижение затрат, %
Работодатель, косвенные эффекты	ЭГК	43	–	–
Работодатель, совокупный эффект	Электронный паспорт и ЭГК	55,165	–	–
Учреждение образования (для 5 тыс. студентов)	Электронный паспорт	20,540	440 рабочих дней	27
Кадровое агентство (50 вакансий/год)	ЭГК	89,250	В 3,1 раза	–
Государство (национальный масштаб)	Электронный паспорт	92 800	–	84

Проведенные расчеты экономической эффективности внедрения технологий цифровой верификации профессиональных квалификаций демонстрируют следующие ключевые результаты:

- экономическая эффективность проявляется на всех уровнях – от отдельной организации до национальной экономики. При этом относительная экономия затрат составляет 27–94 % в зависимости от сценария применения;

- внедрение системы электронных паспортов компетенций на национальном уровне обеспечивает экономию 92,8 млн руб. ежегодно, что эквивалентно высвобождению ресурсов для других направлений развития человеческого капитала;

- помимо прямой экономии затрат, технологии обеспечивают повышение качества кадровых решений, снижение рисков, повышение прозрачности рынка труда, что создает дополнительную экономическую ценность, сложно поддающуюся точной количественной оценке;

- оптимальная стратегия для крупных организаций – комбинированное применение обеих технологий в зависимости от категорий персонала и задач верификации, что максимизирует общий экономический эффект.

Сценариями применения ЭГК являются:

- 1) подбор специалистов на ключевые позиции – углубленная оценка кандидатов на должности руководителей высшего и среднего звена, ведущих специалистов, требующих высокой квалификации и подтвержденного опыта применения компетенций;

- 2) системы управления талантами – создание кадрового резерва на основе объективной оценки профессионального потенциала работников, планирование карьерных траекторий, выявление высокопотенциальных сотрудников;

- 3) формирование проектных команд – подбор специалистов для выполнения сложных проектов на основе анализа доказательств применения соответствующих компетенций;

- 4) персонализированное профессиональное развитие – формирование индивидуальных траекторий развития на основе анализа имеющихся компетенций, выявления пробелов и определения оптимальных направлений обучения с применением ИИ;

- 5) кадровые агентства премиум-сегмента – повышение качества и скорости подбора специалистов на основе объективной проверенной информации о профессиональном опыте и компетенциях кандидатов.

Разработанная технология ЭГК соответствует глобальным трендам цифровой трансформации систем управления человеческими ресурсами [6, 7]. Принципиальным отличием этого решения от существующих международных практик является сочетание: портативного физического носителя информации, обеспечивающего автономность от сетевой инфраструктуры и полный контроль владельца над своими данными; структурированного хранения до 500 записей о доказательствах практического применения компетенций с автоматической весовой оценкой достоверности по шести параметрам; криптографической защиты данных на уровне стандарта Common Criteria EAL5+ и двухуровневой верификации через цифровые подписи и блокчейн; возможности

экспорта структурированных данных для анализа ИИ при сохранении контроля владельца над уровнем детализации предоставляемой информации. Представленная технология ЭГК дополняет методологию применения больших языковых моделей для анализа профессиональных компетенций на рынке труда [1]. Если большие языковые модели позволяют анализировать требования работодателей к компетенциям на основе неструктурированных текстов вакансий, то ЭГК обеспечивает структурированное представление фактических компетенций работников с доказательствами их применения. Интеграция этих двух подходов создает комплексную систему управления компетенциями на рынке труда:

- большие языковые модели выявляют востребованные компетенции и формируют профили требований для различных профессий на основе анализа вакансий;
- ЭГК предоставляет объективные данные о фактических компетенциях работников с доказательствами применения;
- системы ИИ осуществляют сопоставление требований и возможностей, выявляют оптимальные совпадения, формируют рекомендации по профессиональному развитию.

Заключение

1. Разработана технология электронного генома компетенций, обеспечивающая структурированное хранение до 500 доказательств практического применения компетенций с автоматической оценкой достоверности, формированием утверждений о способностях и интеграцией с искусственным интеллектом для анализа профессионального потенциала. Экономическая эффективность применения технологии подтверждена расчетами: для работодателей – сокращение времени углубленной оценки в 4,4 раза, снижение прямых затрат на 77 %, косвенные эффекты обеспечивают дополнительную экономию 43 тыс. руб. ежегодно; для учреждений образования – экономия 20,54 тыс. руб. в год при обработке данных от 5000 студентов, для кадровых агентств – экономия 89,25 тыс. руб. в год при обработке 50 вакансий.

2. Определены сценарии применения электронного генома компетенций: подбор специалистов на ключевые позиции, развитие систем управления талантами, формирование проектных команд, персонализированное профессиональное развитие, развитие премиум-сегмента кадровых агентств. Обоснована возможность интеграции технологии электронного генома компетенций с искусственным интеллектом для выявления профессиональных моделей поведения, оценки готовности к новым ролям, определения пробелов в компетенциях, формирования траекторий развития, оценки профессионального потенциала.

3. Разработанная система автоматической весовой оценки достоверности доказательств по шести параметрам формирует теоретическую основу для перехода от формальной верификации квалификаций к доказательной HR-аналитике, что расширяет методологический инструментарий цифровой трансформации управления человеческими ресурсами.

4. Внедрение технологии электронного генома компетенций создает основу для качественной трансформации систем управления талантами в организациях Республики Беларусь: переход от субъективных оценок к объективным доказательствам применения компетенций, формирование персонализированных траекторий профессионального развития на основе анализа профессионального потенциала средствами искусственного интеллекта, снижение рисков ошибочного найма на ключевые позиции за счет углубленной верификации практического опыта, создание систем непрерывного профессионального развития с учетом выявленных пробелов в компетенциях.

5. Практическая ценность результатов исследования определяется возможностью их использования различными группами стейкхолдеров. Для руководителей организаций и специалистов отделов кадров – технико-экономическое обоснование внедрения систем углубленной оценки кандидатов на ключевые позиции и формирование кадрового резерва на основе объективного анализа профессионального потенциала. Для кадровых агентств – методология повышения качества подбора руководителей и высококвалифицированных специалистов с применением доказательной верификации компетенций. Для учреждений образования – основа для разработки персонализированных программ профессионального развития с учетом пробелов в компетенциях работников. Для государственных органов – технико-экономическое обоснование формирования

национальной экосистемы управления талантами с применением передовых цифровых технологий и искусственного интеллекта. Результаты также могут быть использованы исследователями в области цифровой трансформации HR, преподавателями при подготовке специалистов по управлению талантами и в HR-аналитике.

Список литературы

1. Калиновская, И. Н. Применение больших языковых моделей для анализа профессиональных компетенций на региональном рынке труда Республики Беларусь / И. Н. Калиновская // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 2. С. 21–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-2-21-31>.
2. Приженникова, А. Н. Технологии блокчейн в трудовых правоотношениях: перспективы и развитие / А. Н. Приженникова // Образование и право. 2019. № 1. С. 216–220.
3. Sharples, M. The Blockchain and Kudos: A Distributed System for Educational Record, Reputation and Reward / M. Sharples, J. Domingue // Adaptive and Adaptable Learning. EC-TEL 2016. Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9891. P. 490–496.
4. Jirgensons, M. Blockchain and the Future of Digital Learning Credential Assessment and Management / M. Jirgensons, J. Kapenieks // Journal of Teacher Education for Sustainability. 2018. Vol. 20, No 1. P. 145–156.
5. Swan, M. Blockchain: Blueprint for a New Economy / M. Swan. USA: O'Reilly Media, 2015.
6. The Skills Genome [Electronic resource] // Lightcast. Mode of access: <https://lightcast.io/resources/talent/the-skills-genome>. Date of access: 19.01.2025.
7. How We Mapped the “Skills Genome” of Emerging Jobs [Electronic resource] // LinkedIn Engineering Blog. Mode of access: <https://engineering.linkedin.com/blog/2019/how-we-mapped-the-skills-genome-of-emerging-jobs>. Date of access: 19.01.2025.
8. Электронный геном компетенций на физическом носителе: пат. ВУ 13961 U 2026.12.01 Респ. Беларусь: МПК G06K 19/077 (2006.01), G06F 21/64 (2013.01) / И. Н. Калиновская, А. И. Калиновский; заявители И. Н. Калиновская, А. И. Калиновский; заявка и 20260002; заявл. 12.01.2026; опубл. 20.04.2026. Бюл. № 2.
9. Электронный паспорт компетенций на физическом носителе с защитой информации на основе блокчейн-технологии: пат. ВУ 13899 U 2026.01.05 Респ. Беларусь: МПК G06K 19/077 (2006.01) / Е. В. Ванкевич, И. Н. Калиновская, А. И. Калиновский; заявитель Витебский государственный технологический университет; заявка и 20250104; заявл. 12.05.2025; опубл. 05.01.2026. Бюл. № 1.
10. Калиновская, И. Н. Электронный паспорт компетенций: технико-экономическое обоснование цифровой трансформации базовой верификации профессиональных квалификаций / И. Н. Калиновская // Цифровая трансформация. 2026. Т. 32, № 1. С. 51–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-1-51-60>.

Поступила 03.04.2026

Принята в печать 05.05.2026

Доступна на сайте 10.07.2026

References

1. Kalinouskaya I. N. (2025) The Use of Large Language Models for the Analysis of Professional Competencies in the Regional Labor Market of the Republic of Belarus. *Digital Transformation*. 31 (2), 21–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-2-21-31> (in Russian).
2. Prizhennikova A. N. (2019) Blockchain Technologies in Labor Relations: Prospects and Development. *Education and Law*. (1), 216–220 (in Russian).
3. Sharples M. (2016) The Blockchain and Kudos: A Distributed System for Educational Record, Reputation and Reward. *Adaptive and Adaptable Learning. EC-TEL 2016. Lecture Notes in Computer Science*. 9891, 490–496.
4. Jirgensons M., Kapenieks J. (2018) Blockchain and the Future of Digital Learning Credential Assessment and Management. *Journal of Teacher Education for Sustainability*. 20 (1), 145–156.
5. Swan M. (2015) *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. USA, O'Reilly Media Publ.
6. The Skills Genome. *Lightcast*. Available: <https://lightcast.io/resources/talent/the-skills-genome> (Accessed 19 January 2025).
7. How We Mapped the “Skills Genome” of Emerging Jobs. *LinkedIn Engineering Blog*. Available: <https://engineering.linkedin.com/blog/2019/how-we-mapped-the-skills-genome-of-emerging-jobs> (Accessed 19 January 2025).
8. Kalinouskaya I. N., Kalinovsky A. I. (2026) Electronic Genome of Competencies on a Physical Medium. *Patent BY 13961 U 2026.12.01 Republic of Belarus, IPC G06K 19/077 (2006.01), G06F 21/64 (2013.01)*. Applicant I. N. Kalinouskaya, A. I. Kalinovsky; application u 20260002; filed 12.01.2026; published 20.04.2026. *Bulletin No 2* (in Russian).

9. Vankevich E. V., Kalinouskaya I. N., Kalinowski A. I. (2026) Electronic Passport of Competencies on a Physical Medium with Information Protection Based on Blockchain Technology. *Patent BY 13899 U 2026.01.05, Republic of Belarus. IPC G06K 19/077 (2006.01). Applicant Vitebsk State Technological University. Application u 20250104; filed 12.05.2025; published 05.01.2026. Bulletin No 1* (in Russian).
10. Kalinouskaya I. N. (2026) Electronic Competency Passport: A Feasibility Study of the Digital Transformation of Professional Qualifications Basic Verification. *Digital Transformation*. 32 (1), 51–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-1-51-60> (in Russian).

Received: 3 April 2026

Accepted: 5 May 2026

Available on the website: 10 July 2026

Сведения об авторе

Калиновская И. Н., канд. техн. наук, доц. каф. экономики и электронного бизнеса, Витебский государственный технологический университет

Адрес для корреспонденции

210039, Республика Беларусь,
Витебск, просп. Московский, 72
Витебский государственный
технологический университет
Тел.: +375 29 515-92-21
E-mail: i-kalinovskaya@yandex.by
Калиновская Ирина Николаевна

Information about the author

Kalinouskaya I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Economics and E-Business, Vitebsk State University of Technology

Address for correspondence

210039, Republic of Belarus,
Vitebsk, Moskovsky Ave., 72
Vitebsk State University
of Technology
Tel.: +375 29 515-92-21
E-mail: i-kalinovskaya@yandex.by
Kalinouskaya Iryna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-22-27>

УДК 656.078.5:004

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ В СФЕРЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

С. Ф. КУГАН, А. М. ВОРОНИНА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Проведено исследование применяемых на объектах логистической инфраструктуры цифровых технологий. Сделан акцент на специфику логистической деятельности, цифровизация которой порождает новый класс угроз – киберфизических рисков, при реализации которых, помимо сбоя, в материальных потоках формируются мультипликативные экономические потери по всей цепи поставок. Рассмотрены экономико-математические модели, обоснована эффективность их применения для объектов логистической инфраструктуры. Доказана важность интегрированного подхода к управлению информационной безопасностью в условиях быстро меняющегося внешнего окружения.

Ключевые слова: киберинцидент, киберфизические риски, объекты логистической инфраструктуры, управление, экономико-математические модели.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Куган, С. Ф. Применение экономико-математического инструментария в сфере информационной безопасности объектов логистической инфраструктуры / С. Ф. Куган, А. М. Воронина // Цифровая трансформация. 2026. Т. 32, № 2. С. 22–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-22-27>.

APPLICATION OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL TOOLS IN THE FIELD OF INFORMATION SECURITY OF LOGISTICS INFRASTRUCTURE FACILITIES

SVETLANA KUHAN, ALINA VORONINA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This paper examines digital technologies used in logistics infrastructure facilities. It emphasizes the specific nature of logistics activities, whose digitalization creates a new class of threat – cyber-physical risks. These risks, when realized, not only disrupt material flows, but also cause multiplicative economic losses throughout the supply chain. Economic and mathematical models are examined, and their effectiveness for logistics infrastructure facilities is substantiated. The importance of an integrated approach to information security management in a rapidly changing external environment is demonstrated.

Keywords: cyber incident, cyber-physical risks, logistics infrastructure facilities, management, economic and mathematical models.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Kuhan S., Voronina A. (2026) Application of Economic and Mathematical Tools in the Field of Information Security of Logistics Infrastructure Facilities. *Digital Transformation*. 32 (2), 22–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-22-27> (in Russian).

Введение

Современные тенденции в сфере логистики, призванные решать сложные творческие задачи, направлены в первую очередь на решение недетерминированных задач в режиме реального времени, а во вторую – на создание нового формата взаимодействия в системе «человек – машина», где человек рассматривается уже не как помеха, а как ценный ресурс, способный решать нетипичные задачи, контролируя при этом выполнение машинами стандартных, рутинных работ. Существующий спрос на эффективные логистические решения (рис. 1) обусловлен лавинным спросом на онлайн-покупки.

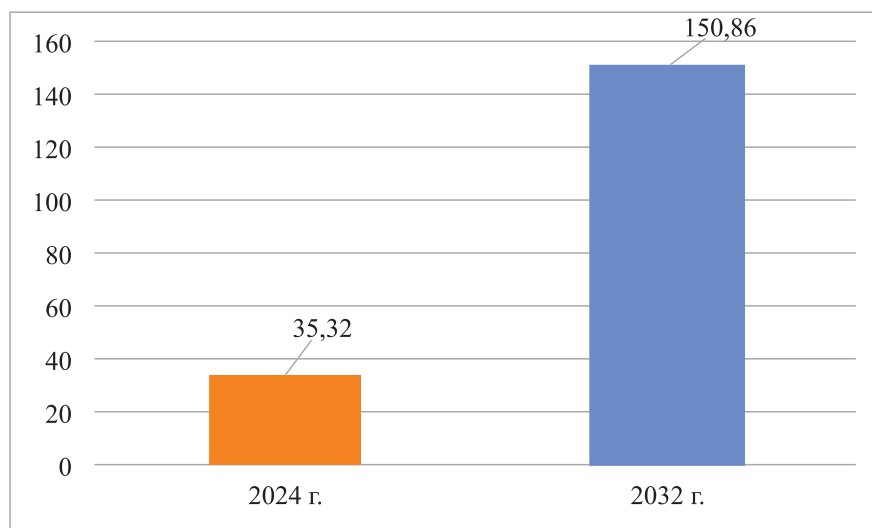


Рис. 1. Размер рынка логистических услуг [1]

Fig. 1. Logistics services market size [1]

Возрастающая требовательность со стороны покупателя вынуждает компании, в том числе и логистические, активно использовать цифровые логистические решения, снижая затраты за счет оптимизации складских операций, интеграции передовых технологий, прозрачности услуг доставки. Интеграция таких технологий, как интернет вещей (IoT), искусственный интеллект, машинное обучение и других, обеспечивает точность и оперативность принятия управленческих решений в режиме реального времени.

Однако при всех плюсах цифровизации оптимизм бизнеса несколько снизился из-за значительных первоначальных затрат, с которыми вынуждены считаться логистические компании и которые связаны с инвестициями в цифровые технологии, с обучением персонала, модернизацией устаревших систем, поддержанием работоспособности новой инфраструктуры и с экономическим ущербом от киберинцидентов. Современные технологии, помимо высоких капиталовложений, провоцируют материализацию специфических нефинансовых рисков, бьющих по операционной стабильности, подтверждая тот факт, что объекты логистической инфраструктуры критически зависимы от целостности цифрового контура, стабильности сигнала, отсутствия ошибок в коде и других нюансов.

Формулирование проблемного поля

Новой управленческой реальностью становится ситуация, когда деятельность объекта логистической инфраструктуры напрямую зависит от бесперебойной работы его IT-систем, а также от множественности векторов несанкционированных вторжений. И если в случаях физической поломки оборудования все ясно и понятно (замена изношенных деталей или покупка нового оборудования), то несанкционированное вторжение порождает мультипликативные эффекты за счет подключения смежных звеньев цепочки поставок. То есть имеет место нелинейная взаимосвязь между фактом несанкционированного вторжения (технологическим инцидентом) и последствиями (материальным (экономическим) ущербом).

Другими словами, речь идет об анализе критических точек входа, последствий вариантов несанкционированного доступа через каждую из них, о расчете финансовых последствий

выхода из строя всей или части логистической системы. В этих условиях возникает потребность в подборе экономико-математического инструментария, с помощью которого можно не только просчитать вероятность наступления рискованной ситуации, но и смоделировать каскадные последствия материализации киберинцидента, расчет которых невозможен простой калькуляцией потерь. Под киберинцидентом (цифровым инцидентом) понимается событие или последовательность событий в информационно-телекоммуникационной среде, повлекшее негативные последствия в виде нарушения функционирования системы или сети, целостности, доступности или конфиденциальности данных, а также в нанесении реального или потенциального ущерба охраняемым законом общественным отношениям.

Последствия от материализации киберугроз для объектов логистической инфраструктуры сложно рассчитать через стандартное нормальное распределение ущерба, так как в логистике имеет место каскадный операционный ущерб. Поэтому используемые в анализе модели должны содержать не только технологический (архитектура системы (SCADA, WMS, TMS, IoT-датчики)), но и экономический слой – поток создания стоимости (Just-in-Time, оборачиваемость запасов, штрафы за срыв соглашения по уровню обслуживания (SLA)). Данный синтез возможен через методологию киберфизических систем (CPS), объединяющую кибернетику и управление процессами. CPS представляет собой интеграцию вычислительных ресурсов в физические объекты с последующей возможностью прогнозирования, самонастройки и адаптации к изменениям. В CPS оборудование, включая цифровые датчики, и информационные системы работают как единый механизм на протяжении всей цепочки создания стоимости. По сути, CPS является основой для реализации сценариев развития производства посредством взаимодействия между физическими и цифровыми элементами системы.

Методика исследования

Имитационное моделирование, как наиболее эффективный инструмент анализа рисков, активно используется во всех сферах человеческой деятельности. Актуальность применения и распространенность систем имитационного моделирования рассмотрены в [2–4]. Так, в [4, с. 35] отмечается, что при выборе систем моделирования принято выделять системы проблемно-ориентированного (специализированные) и общецелевого назначения (универсальные). Специализированные имеют узкие области применения, например, OPNET (SteelCentral), COMNET (вычислительные сети), eMPlant, DELMIA (машиностроение и судостроение), ISSOP (производство и логистика), PTV Vision Vissim (транспортные потоки и дорожное движение). Для построения моделей в таких системах применяются готовые наборы типовых элементов моделируемого объекта.

Использование агентного и дискретно-событийного моделирования (ABM/DES) позволяет моделировать цифровой двойник системы (склад, транспортный узел) не непрерывно, а событийно. Данный подход дает возможность рассматривать каждый погрузчик, конвейер, строку в WMS как агента или событие. Моделирование сбоя, например ситуации отказа сервера или нарушения целостности данных в системе управления перевозками (TMS), позволяет рассматривать поведение агентов в конкретном временном интервале, исследовать каскадное распространение последствий в рамках всей цепочки поставок.

Провести оценку системных эффектов на уровне цепей поставок можно с помощью модели «затраты–выпуск» (межотраслевого баланса) Леонтьева с шоковыми переменными и деревьями событий (I/O Models с Event Trees). В основе данной модели лежит понимание взаимосвязанности процессов в экономике, т. е. сбой в одном элементе системы (временная остановка влечет за собой невозможность оказания услуги в полном объеме) через коэффициенты прямых затрат передается всем, кто от него зависит. При этом введение одной шоковой переменной недостаточно, необходимо проследить всю цепочку каскадных изменений, что возможно через дерево событий, переводящее технические сценарии в экономические величины – ожидаемый системный ущерб. По сути, реализуется связка, объединяющая матрицу прямых затрат, рисковое событие и последствия в итоговый мультипликационный эффект, представляющий собой сумму эффектов – прямого и косвенных (первого и второго порядков).

При выборе модели, позволяющей оценить последствия кибератак, стоит обратить внимание на модели гибридных сетей Петри, дающие возможность зафиксировать не только сам факт

несанкционированного входа, но и измерить его последствия – рассчитать объем недопоставленного ресурса как функцию от продолжительности блокировки управляющего сигнала и интенсивности потока. Эта возможность исходит из представления логистического объекта как двуслойной сети, в которой непрерывные маркеры (первый слой) – физические процессы, дискретные маркеры (второй слой) – информационные процессы. Смысл гибридных сетей Петри в том, что они в рамках одной математической схемы (графа, сети) связывают непрерывную динамику физического процесса с дискретностью цифровых управляющих команд.

Экономическая деятельность часто реализуется в условиях полной или частичной неопределенности, что повышает ее риски и не позволяет с полной уверенностью говорить о конечном результате. В данных условиях целесообразно использование модели «Байесовская сеть доверия», которая представляет собой направленный граф, выстраивающий причинно-следственные связи в условиях частичного отсутствия данных, и позволяет связать факты технологической уязвимости (архитектуру ИТ, квалификацию персонала и др.) с вероятностью киберугрозы, а также определить экономические последствия данной ситуации в рамках теории вероятности. Привлекательность такой модели заключается в возможности построения вероятностной модели и вычислении интегрального показателя киберуязвимости объекта, а также реализации обратного анализа, т. е. фактическая ситуация изучается сетью с раскладом до вероятностной первопричины цифровой природы, что позволяет разделять технологические и организационные риски.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование работ, посвященных информационной безопасности объектов критической инфраструктуры [5–7], к которой полноправно относятся объекты логистики, позволяет сделать вывод, что кибератака (киберинцидент) – это не только технический сбой, а целая система каскадных, нарастающих снежным комом проблем с огромными экономическими потерями: от остановок в звеньях цепей поставок до дефицита пропускной способности, потери координации и срыва поставок. Если говорить о различиях в природе киберинцидента и технического отказа оборудования, то главное отличие будет в векторе воздействия.

В случае технического отказа имеет место остановка функционирования оборудования. Как правило, он носит случайный, несистемный характер, в большинстве случаев локализован в пределах конкретной системы или компонента, а основная задача реагирования – восстановление штатной работоспособности инфраструктуры (например, появление на магнитном диске поврежденных участков, из-за чего часть файлов становится недоступна). Кибератака вызывает не только фактическую остановку, но и утрату контроля над процессом, снижение результативности управления, искажение истинной ситуации (например, атака на цепочку поставок, когда искажение данных в одном звене цепи может привести к ошибкам в планировании, перерасходу ресурсов, задержкам и проч.). Подобная ситуация формирует эмерджентный ущерб, когда экономические последствия представляют собой нелинейную реакцию всей логистической системы на утрату доверия к данным:

- один инцидент затрагивает множество организаций;
- лавинообразный эффект распространения;
- восстановление предполагает четкую координацию действий всех участников цепи.

В отличие от технического отказа киберинцидент носит целенаправленный характер: несанкционированный доступ к данным компании, намеренное их искажение, использование взаимосвязи между компонентами и организациями для расширения масштаба атаки. В случае материализации данного события собираются доказательства внешнего воздействия: подозрительные сетевые соединения, следы вредоносного программного обеспечения, несанкционированные изменения системных файлов или конфигураций, которые невозможно объяснить случайными сбоями. Важно исключить технические причины (экспертиза оборудования и программного обеспечения, отсутствие физических повреждений и проч.). Нелинейность реакции системы проявляется в том, что последствия несоразмерны первоначальному воздействию и возникают из-за каскадного распространения по сложным взаимосвязям (например, нарушение бизнес-процессов логистической сети). Остановка поставок одной компании вызывает задержки, штрафы или дополнительные затраты у ее партнеров, что фиксируется через анализ контрактов, журналы событий, финансовые отчеты и официальные обращения. Стандартное распределение

ущерба (нормальное, экспоненциальное) здесь неприменимо, так как в подобной ситуации отсутствуют стационарность и независимость событий. Для кибератаки свойственны асимметричные последствия, зависящие от динамики угроз и сетевых эффектов.

Заключение

1. Имитационное моделирование представляется целесообразным сочетать с моделью «затраты–выпуск», дополненной шокowymi переменными и деревьями событий, а также с гибридными сетями Петри и байесовскими сетями доверия. Это позволит связать технологический слой (SCADA, WMS, TMS, IoT) с экономическим и количественно оценить каскадный эффект киберинцидента.

2. Киберинцидент, в отличие от технического отказа, порождает потерю контроля и искажение данных, что вызывает нелинейный эмерджентный ущерб, мультиплицируемый по цепи поставок. Стандартные распределения ущерба здесь неприменимы.

3. Рекомендованы интегрированный подход на базе киберфизических систем и обратный анализ по байесовской сети для разделения технологических и организационных рисков.

4. Перспективы дальнейших исследований заключаются в создании типовых цифровых двойников для складов, хабов и портов, в совершенствовании моделей мультипликативных потерь с учетом санкций по SLA, интеграции с системами мониторинга информационной безопасности и углубленного анализа человеческого фактора в новой парадигме взаимодействия «человек – машина».

Список литературы

1. Анализ размера, доли и тенденций мирового рынка цифровой логистики – обзор отрасли и прогноз до 2032 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-digital-logistics-market>. Дата доступа: 09.04.2026.
2. Антюшеня, Д. М. Транспортно-логистическая система Республики Беларусь: становление и развитие / Д. М. Антюшеня. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2016.
3. AnyLogic моделирование для обоснованных решений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/>. Дата доступа: 25.04.2026.
4. Даденков, С. А. Анализ моделей и методов агентного и дискретно-событийного имитационного моделирования / С. А. Даденков, Е. Л. Кон // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 35–41.
5. Реализация требований обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры с помощью автоматизации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/securityvison/articles/1026904/>. Дата доступа: 23.04.2026.
6. Биктубаева, К. С. К вопросу об обеспечении информационной безопасности объектов критической информационной инфраструктуры / К. С. Биктубаева // Информационные технологии обеспечения комплексной безопасности в цифровом обществе: материалы VII Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Уфа, 23–24 мая 2025 г. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. С. 226–229.
7. Исмагилова, А. С. Теоретико-графовая интерпретация системы защиты информации / А. С. Исмагилова, И. А. Шагапов, И. В. Салов // Инженерный вестник Дона. 2024. № 9. С. 171–179.

Поступила 30.04.2026

Принята в печать 22.05.2026

Доступна на сайте 10.07.2026

References

1. *Analysis of the Size, Share, and Trends of the Global Digital Logistics Market – Industry Overview and Forecast to 2032*. Available: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-digital-logistics-market> (Accessed 9 April 2026) (in Russian).
2. Antyushenya D. M. (2016) *Transport and Logistics System of the Republic of Belarus: Formation and Development*. Minsk, Belarusian National Technical University (in Russian).
3. *AnyLogic Modeling for Informed Decisions*. Available: <https://www.anylogic.ru/> (Accessed 25 April 2026) (in Russian).
4. Dadenkov S. A., Kon E. L. (2015) Comparison of Agent-Based and Discrete-Event Simulation Models and Methods. *Bulletin of ETU “LETI”*. (5), 35–41 (in Russian).
5. *Implementation of Critical Information Infrastructure Security Requirements Using Automation*. Available: <https://habr.com/ru/companies/securityvison/articles/1026904/> (Accessed 23 April 2026) (in Russian).

6. Biktubaeva K. S. (2025) On the Issue of Ensuring Information Security of Critical Information Infrastructure Facilities. *Information Technologies for Ensuring Comprehensive Security in a Digital Society, Proceedings of the VII All-Russian Youth Scientific and Practical Conference with International Participation, Ufa, May 23–24*. Ufa, Ufa University of Science and Technology. 226–229 (in Russian).
7. Ismagilova A. S., Shagapov I. A., Salov I. V. (2024) Graph-Theoretical Interpretation of the Information Security System. *Engineering Bulletin of the Don*. (9), 171–179 (in Russian).

Received: 30 April 2026

Accepted: 22 May 2026

Available on the website: 10 July 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Куган С. Ф., д-р экон. наук, доц., нач. упр. подготовки научных кадров высшей квалификации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Воронина А. М., магистр, асп. каф. экономики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 792-52-12
E-mail: sfkugan@mail.ru
Куган Светлана Федоровна

Information about the authors

Kuhan S., Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Department for Training of Highly Qualified Scientific Personnel, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Voronina A., M. Sci., Postgraduate of the Department of Economics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 792-52-12
E-mail: sfkugan@mail.ru
Kuhan Svetlana



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-28-34>

УДК 004.056:616-071:615.47

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИТЫ МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ ПАЦИЕНТОВ В БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

О. Б. ЗЕЛЬМАНСКИЙ, В. А. БОГУШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассмотрена интеграция биотехнических устройств и систем в медицинскую информационную сеть. Обосновано применение методов криптографической защиты медицинских данных, передаваемых между различными системами, приложениями и организациями здравоохранения, с целью обеспечения их конфиденциальности и целостности с учетом требований по работе с персональными данными и к врачебной тайне. Разработано программное средство, реализующее обработку информации в формате сообщений стандарта Health Level Seven, их шифрование и дешифрование. Исследованы зависимости скорости шифрования и объема выходных данных от применяемого криптографического алгоритма, что позволило обосновать выбор алгоритма, обладающего высоким быстродействием и минимальным влиянием на функционирование биотехнических систем. На основе результатов исследования по защите информации, передаваемой с использованием Health Level Seven, продемонстрирована целесообразность гибридного шифрования.

Ключевые слова: биотехнические системы, стандарт Health Level Seven, криптография, защита персональных данных, врачебная тайна, цифровизация здравоохранения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Зельманский, О. Б. Обеспечение защиты медицинских данных пациентов в биотехнических системах / О. Б. Зельманский, В. А. Богуш // Цифровая трансформация. 2026. Т. 32, № 2. С. 28–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-28-34>.

ENSURING THE PROTECTION OF PATIENT MEDICAL DATA IN BIOTECHNICAL SYSTEMS

OLEG ZELMANSKI, VADIM BOGUSH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This paper examines the integration of biotechnical devices and systems into a medical information network. The use of cryptographic protection methods for medical data transferred between various systems, applications, and healthcare organizations is substantiated to ensure their confidentiality and integrity, taking into account requirements for handling personal data and medical confidentiality. A software tool has been developed that implements the processing of information in the Health Level Seven message format, as well as their encryption and decryption. The dependence of encryption speed and output data size on the cryptographic algorithm used is analyzed, allowing for the selection of an algorithm offering high performance and minimal impact on the functioning of biotechnical systems. Based on the results of the study on the protection of information transferred using Health Level Seven, the feasibility of hybrid encryption is demonstrated.

Keywords: biotechnical systems, Health Level Seven standard, cryptography, personal data protection, medical confidentiality, digitalization of healthcare.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Zelmanski O., Bogush V. (2026) Ensuring the Protection of Patient Medical Data in Biotechnical Systems. *Digital Transformation*. 32 (2), 28–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-28-34> (in Russian).

Введение

Одной из актуальных задач в рамках цифровизации системы здравоохранения является стандартизация процессов обработки, хранения и передачи медицинских данных в информационных системах при взаимодействии организаций, участвующих в оказании медицинской помощи^{1,2}. Для ее решения международным сообществом по вопросам информатизации здравоохранения Health Level Seven International, аккредитованным American National Standards Institute, предложен стандарт HL7 (Health Level Seven), к которому в 2018 году в рамках реализации проекта «Модернизация системы здравоохранения Республики Беларусь» присоединилась наша страна.

Стандарт HL7 используется в качестве основы для цифровой трансформации здравоохранения, обеспечивая совместимость данных для электронных медицинских карт, телемедицины и управления здоровьем населения. Для здравоохранения документ предоставляет множество преимуществ. Однако HL7 не решает проблему безопасности медицинских данных, в том числе персональных [1], поскольку не содержит встроенных функций обеспечения конфиденциальности и целостности. Наиболее очевидные угрозы безопасности, изложенные в HL7, аналогичны Telnet (Teletype Network) и FTP (File Transfer Protocol) и связаны с открытостью текста, отсутствием аутентификации и проверок, с иными уязвимостями³. Поэтому для защиты медицинской информации (Protected Health Information) необходимо применять сторонние средства защиты на сетевом (протокол Internet Protocol Security), транспортном (протокол Transport Layer Security 1.3) или прикладном (протокол Hyper Text Transfer Protocol Secure) уровнях модели взаимодействия открытых систем или обеспечивать безопасность всей среды передачи (частная закрытая сеть, защищенная канальными средствами).

В то же время решение задачи обеспечения безопасности передаваемой медицинской информации в соответствии со стандартом HL7 [2, 3] может быть основано на использовании алгоритмов шифрования. Основные требования, которые должны предъявляться к алгоритмам шифрования информации, обрабатываемой в синтезируемых биотехнических системах, – это высокая криптографическая стойкость и производительность.

Анализ формата медицинских данных, передаваемых с использованием стандарта Health Level Seven

Наиболее распространенными версиями стандарта HL7 являются HL7 Version 2.x (v2) и HL7 Version 3 (v3). Версия HL7 Version 2.x (v2), широко применяемая на практике для обмена клиническими и административными данными между информационными системами учреждения здравоохранения, обеспечивает обратную совместимость между версиями 2.x. Однако в HL7 Version 2.x (v2) отсутствуют встроенные механизмы защиты передаваемых данных, передача сообщений осуществляется в открытом виде с помощью протокола низкого уровня MLLP (Minimal Lower Layer Protocol), инкапсулированного в стек протоколов TCP/IP.

Версия HL7 Version 3 (v3) отличается более строгой и формально определенной структурой сообщений, такой как CDA (Clinical Document Architecture) XML-структура. Несмотря на предусмотренные метаданные безопасности, в частности, пометки о конфиденциальности отдельных элементов данных, проблема их защиты остается актуальной и для HL7 Version 3 (v3). Передача сообщений в HL7 Version 3 (v3) осуществляется с использованием веб-сервисов SOAP/Web Services, REST/HTTP. Следует отметить, что ввиду большого объема, избыточной сложности и отсутствия совместимости с HL7 Version 2.x (v2), затрудняющих переход с уже налаженных интерфейсов, версия HL7 Version 3 (v3) не получила широкого практического применения.

¹ Об утверждении Концепции развития электронного здравоохранения Республики Беларусь: приказ Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 20 марта 2018 г. № 244 [Электронный ресурс] // Министерство здравоохранения Республики Беларусь. Режим доступа: https://www.grsmu.by/files/file/university/accreditation/eHealth_conception.pdf. Дата доступа: 04.02.2026.

² Об утверждении Концепции создания единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения: приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 28 апреля 2011 г. № 364 [Электронный ресурс] // Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации. Режим доступа: <https://minzdrav.gov.ru/documents/%207200-prikaz-minzdravsotsrazvitiya-rossii-364-ot-28-aprelya-2011-g>. Дата доступа: 04.02.2026.

³ Хазелхорст, Д. Взлом интерфейсов данных HL7 в медицинских средах: атака и защита – ахиллесова пята здравоохранения [Электронный ресурс] / Д. Хазелхорст. Режим доступа: <https://linuxincluded.com/hl7-medical-attacking-defending/>. Дата доступа: 24.02.2025.

Сочетание идей HL7 Version 2.x (v2) и HL7 Version 3 (v3) и упрощение интеграции благодаря использованию веб-технологий позволили сообществу Health Level Seven International разработать новый стандарт для обмена медицинскими данными FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources). FHIR поддерживает современные методы передачи данных, а именно – RESTful API, что улучшает совместимость с веб-сервисами и мобильными приложениями, но в то же время увеличивает вероятность атак через API и получения несанкционированного доступа к медицинским данным, например, в случае использования недостаточно надежной аутентификации или слабых методов авторизации. FHIR описывает только структуры и методы представления данных, а также основанный на использовании меток подход к управлению доступом, но не определяет способы реализации функции безопасности.

Требования законодательства Республики Беларусь к защите медицинских данных

Обмен HL7-сообщениями, содержащими данные пациентов, регламентируется нормами законодательства о персональных данных и врачебной тайне. В Республике Беларусь сформирована правовая база⁴, устанавливающая строгие требования к обработке и передаче информации о пациенте в электронной форме.

Следует отметить, что информация о пациенте в HL7-сообщениях представляет собой персональные данные, а биометрическая информация и сведения о здоровье – это специальная категория данных. В связи с чем необходимы наличие законных оснований для обработки таких данных (согласие пациента, исполнение медучреждением своих обязанностей) и соблюдение принципов минимизации, целевой обусловленности. Более того, оператор (и уполномоченные лица) обязан принимать правовые, организационные и технические меры защиты персональных данных от несанкционированного доступа, изменения, распространения и иных неправомерных действий.

Принятый в Республике Беларусь закон⁴ прямо указывает на обязательные меры, включающие техническую и криптографическую защиту персональных данных, предусматривает заключение соглашений с уполномоченными лицами (IT-подрядчиками), где отдельно прописываются обязанности по сохранению конфиденциальности персональных данных и обеспечению мер защиты. Работник, который обязан сохранять врачебную тайну, считается соблюдающим требования по защите данных, однако и от него требуется выполнение мер безопасности.

Согласно закону «О здравоохранении»⁵, к сведениям, составляющим врачебную тайну, относится информация о факте обращения человека за медицинской помощью, состоянии здоровья, диагнозе, методах лечения и прогнозе. Медицинские работники и организации обязаны хранить данную информацию в тайне и не разглашать ее без согласия пациента (за исключением случаев, прямо предусмотренных законом).

Таким образом, диагнозы, результаты обследований, личные данные пациентов, передаваемые посредством HL7-сообщений, подпадают под действие закона⁵. HL7-сообщения, содержащие персональные медицинские данные, должны передаваться с соблюдением строгих мер защиты, запрещающих доступ к несанкционированному раскрытию врачебной тайны. С учетом требований законодательства применение криптографических методов защиты является обоснованным и необходимым при передаче информации через общедоступные сети.

Результаты исследований программных средств шифрования и их обсуждение

С целью организации обмена информацией в соответствии со стандартом HL7 и выполнения шифрования и дешифрования HL7-сообщений на языке C# (.NET Core) было разработано консольное программное средство, позволяющее оценить скорость шифрования и объем выходных данных для симметричного алгоритма шифрования на примере AES и асимметричного алгоритма шифрования на примере RSA. Программное средство поддерживает работу с такими основными типами HL7-сообщений, как административные (ADM/ADT), заказы на исследования (ORM), результаты обследований (ORU), финансовые транзакции (DFT) и др. [4]. Наиболее распространенным, содержащим типовой набор персональных данных, пересылаемых между

⁴ О защите персональных данных: Закон Республики Беларусь от 7 мая 2021 г. № 99-3 // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. 2021. № 5/2.

⁵ О здравоохранении: Закон Республики Беларусь от 18 июня 1993 г. № 2435-XII // Ведомости Верховного Совета Республики Беларусь. 1993. № 24. (В редакции Закона Республики Беларусь от 11.01.2023 № 214-3).

информационными системами, является административное HL7-сообщение ADT^A01 о госпитализации/приеме пациента, формируемое при его поступлении в стационар. Структура данного сообщения состоит из ключевых полей, содержащих следующую информацию:

- идентификационные данные пациента: номер медицинской карты, номер истории болезни, номер страхового свидетельства (сегмент PID, поле ID);
- персональные данные пациента: фамилия, имя, отчество, дата рождения, пол, адрес регистрации, контактный телефон (сегмент PID, поля Patient Name, DOB, Sex, Address, Phone);
- медицинские сведения пациента: текущий диагноз или причина госпитализации (сегмент DG1, поле Diagnosis), информация об аллергиях (сегмент AL1) или о проведенных процедурах при приеме;
- административные данные пациента: код отделения/палаты, данные о врачах (лечащий врач, направивший врач), дата и время поступления (сегмент PV1);
- страховые и финансовые данные пациента: информация о страховой компании, страховом полисе, платежных гарантиях (сегменты IN1/IN2).

Таким образом, содержащаяся в ADT^A01 HL7-сообщения информация представляет собой персональные данные, составляет врачебную тайну и подпадает под действие законов^{4,5}. В связи с чем ее хранение и передача посредством открытых сетей требуют применения криптографических мер защиты. С целью обоснования выбора криптографического алгоритма шифрования предлагаются следующие критерии:

- криптостойкость, характеризующая надежность и устойчивость шифрования;
- скорость шифрования/расшифрования, поскольку медицинские интерфейсы часто работают в режиме реального времени, обмениваясь сотнями сообщений в минуту;
- эффективность по объему – минимизация добавления криптографических служебных данных, что является немаловажным критерием при ограничении пропускной способности канала связи.

Приведем описание используемых в программном средстве .NET библиотек:

System – включает в себя базовые классы и типы, такие как строки, коллекции, операции ввода/вывода и др.;

System.Diagnostics – содержит классы для взаимодействия с такими диагностическими инструментами, как таймеры и логи. Используется для измерения времени шифрования;

System.Security.Cryptography – пространство имен для работы с криптографическими алгоритмами. Включает классы для симметричного и асимметричного шифрования, хеширования, создания подписей и других криптографических операций;

System.Text – предоставляет классы для работы с текстом (строками), кодировками и т. д. Используется для кодирования и декодирования HL7-сообщений в байтовый формат.

В качестве входных данных программного средства выступает строка sampleH17, содержащая формируемые веб-приложением HL7-сообщения. В случае симметричного алгоритма AES создается новый объект aes с ключом 256 бит и блоком 128 бит, генерируются случайный ключ и необходимый для режима шифрования CBC (Cipher Block Chaining) вектор инициализации с помощью aes.GenerateKey() и aes.GenerateIV() соответственно. Далее функция AesEncrypt() выполняет шифрование. При этом данные записываются в поток CryptoStream, результат сохраняется в MemoryStream, а через консоль выводится время, затраченное на шифрование. Для получения измеримого времени при очень быстрых операциях процесс шифрования включает 1000 повторений. После чего измеряется и выводится через консоль объем полученного шифротекста в байтах, а также часть зашифрованных данных в шестнадцатеричном виде. Функция AesDecrypt() выполняет дешифрование данных, используя тот же ключ и вектор инициализации, что и при шифровании. Далее расшифрованное сообщение выводится через консоль и сопоставляется с исходным. В случае асимметричного алгоритма RSA создается объект RSA с парой ключей размером 2048 бит. Открытый ключ экспортируется для шифрования данных функцией RsaEncrypt(), закрытый – для их дешифрования. Выходными данными программного средства являются время шифрования и объем зашифрованных сообщений. Диаграмма классов разработанного программного средства шифрования и дешифрования HL7-сообщений приведена на рис. 1.

Было выполнено более 11 000 измерений для генерируемых HL7-сообщений, содержащих различный набор данных. Диаграмма сравнения скорости шифрования \log_{10} и криптографической избыточности алгоритмов шифрования AES и RSA разработанного программного средства приведена на рис. 2.

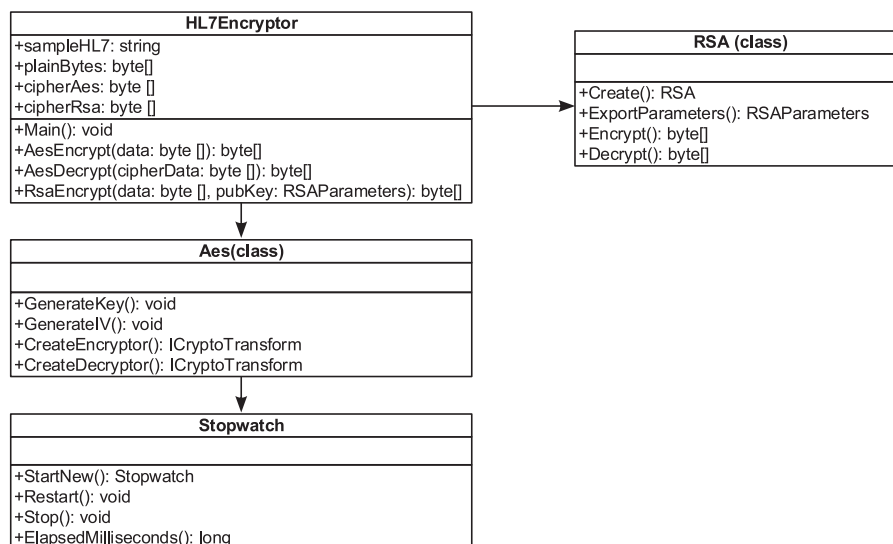


Рис. 1. Диаграмма классов программного средства шифрования и дешифрования HL7-сообщений
Fig. 1. Class diagram of the software for encryption and decryption of HL7 messages

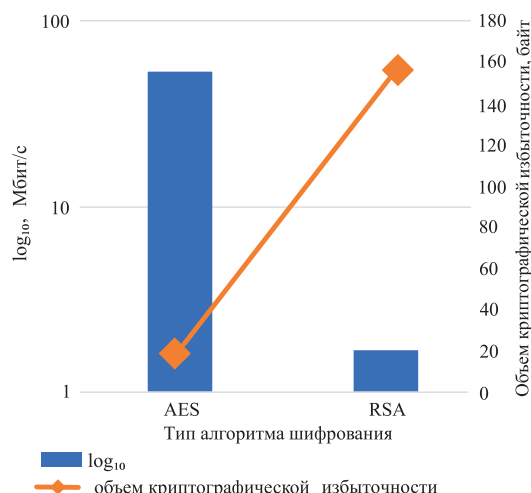


Рис. 2. Диаграмма сравнения производительности и криптографической избыточности алгоритмов шифрования AES и RSA
Fig. 2. Comparative diagram of performance and cryptographic overhead of AES and RSA encryption algorithms

Анализ результатов работы алгоритмов AES и RSA демонстрирует следующее:

- объем исходного HL7-сообщения – 163 байта (UTF8). После AES-шифрования объем шифротекста на 13 байтов превысил объем исходного сообщения за счет добавления служебных данных и составил 176 байтов. RSA-шифрование потребовало разделить исходное сообщение на блоки объемом не более 100 байтов, объем шифротекста после RSA-шифрования каждого блока был определен размером ключа и составил 256 байтов;

- AES-шифрование исходного сообщения объемом 163 байта заняло примерно 0,025 мс, RSA-шифрование одного блока исходного сообщения объемом 100 байтов – 0,48 мс;

- оба алгоритма шифрования не допустили ошибок в процессе шифрования/расшифрования.

Таким образом, при шифровании HL7-сообщений алгоритм AES работает быстрее и незначительно увеличивает объем данных по сравнению с RSA.

Для использования в Республике Беларусь с учетом требований нормативных документов рассмотрен симметричный алгоритм шифрования «БелТ»⁶, представляющий собой усиленную

⁶ Информационные технологии и безопасность. Алгоритмы шифрования и контроля целостности: СТБ 34.101.31–2020. Введ. 01.09.2021. Минск: Госстандарт, 2020.

для соответствия современным требованиям версию ГОСТ 28147–89, аналогом которой является разработанный в Российской Федерации алгоритм по ГОСТ Р 34.12–2015. Указанный алгоритм характеризуется размером блока 64 бита, длиной ключа 256 бит, 32 раундами замен и перестановок. Алгоритм надежен, прост в реализации, имеет невысокие требования к памяти, но может уступать AES по скорости при наличии аппаратно-ускоренного AES. Однако в случае оптимизации и наличия поддержки расширений, например, в российских процессорах «Эльбрус», имеет сопоставимое с AES быстродействие. Объем дополнительных служебных данных составляет объем заполнения до кратности блока (в среднем 8 байтов), а при использовании режима гаммирования с обратной связью – дополнительно длину вектора инициализации 8 байтов.

Таким образом, с учетом национальных нормативных требований для внутренних сертифицируемых систем криптографическую защиту информации, передаваемой с использованием стандарта Health Level Seven, можно обеспечивать с помощью симметричного алгоритма «БелТ», обладающего высоким быстродействием (в сравнении с алгоритмами с открытым ключом) и достаточным уровнем стойкости [5]. С другой стороны, учитывая международную интеграцию в сфере здравоохранения, развитие медицинского туризма и экспорта медицинских услуг, для совместимости с международными системами целесообразной представляется поддержка продемонстрированного в ходе проведенных исследований более высокого быстродействия при шифровании как малых, так и больших массивов данных алгоритма AES [6], рекомендованного в настоящее время NIST. С практической точки зрения реализация AES доступна во всех стандартных библиотеках ввиду того, что AES является мировым стандартом, в то время как для «БелТ» требуются либо сторонние библиотеки, либо собственная реализация. При этом для организации гибридной криптографической системы возможно применение асимметричного алгоритма RSA с целью шифрования сессионных ключей.

Заключение

1. Проведен анализ уязвимостей стандарта Health Level Seven. Установлено, что он не имеет встроенных механизмов защиты передаваемых данных. Предложено использование криптографических методов защиты, основанных на применении алгоритмов шифрования. С целью организации обмена информацией в соответствии со стандартом HL7 разработано программное средство, которое поддерживает работу с основными типами HL7-сообщений, их шифрование и дешифрование, а также позволяет оценить скорость шифрования и объем выходных данных для симметричного алгоритма шифрования на примере AES и асимметричного алгоритма шифрования на примере RSA. Установлено, что при шифровании HL7-сообщений алгоритм AES работает до 20 раз быстрее (0,025 мс для исходного сообщения объемом 163 байта) и незначительно увеличивает объем данных (13 байтов для исходного сообщения объемом 163 байта) по сравнению с алгоритмом RSA (0,48 мс и 156 байтов для исходного сообщения объемом 100 байтов).

2. Обосновано применение симметричного алгоритма шифрования «БелТ» для шифрования информации, передаваемой с использованием стандарта HL7 в национальных сертифицируемых системах Беларуси. Однако, учитывая международную интеграцию в сфере здравоохранения, развитие медицинского туризма и экспорта медицинских услуг, для совместимости с международными системами целесообразной представляется также поддержка алгоритма AES. Для решения задач интеграции целесообразно применение гибридных криптосистем, в которых шифрование пользовательских данных выполняется с помощью симметричных алгоритмов, а шифрование их сессионных ключей – посредством асимметричного алгоритма RSA.

3. Научные исследования выполнены в рамках гранта Президента Республики Беларусь.

Список литературы

1. Магомедов, Ш. Г. Анализ защиты компьютерных сетей и приложений информационных процессов учреждений здравоохранения / Ш. Г. Магомедов // Cloud of Science. 2020. Т. 7, № 3. С. 685–704.
2. Рябко, Б. Я. Криптография в информационном мире / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов. М.: Горячая линия – Телеком, 2018.
3. Khan, A. A. Special Issue on Information Security and Cryptography: The Role of Advanced Digital Technology / A. A. Khan, L. Y. Por // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No 5. DOI: 10.3390/app14052045.

4. Зельманский, О. Б. К вопросу защиты данных в биотехнических системах медицинского назначения / О. Б. Зельманский, С. Н. Петров, Д. А. Фомин // Технические средства защиты информации: материалы XXIII Белор.-Рос. науч.-техн. конф., Минск, 8 апр. 2025 г. Минск, 2025. С. 168–171.
5. Зельманский, О. Б. Обеспечение защиты медицинских данных в биотехнических системах / О. Б. Зельманский // Современные средства связи: материалы XXX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30–31 окт. 2025 г. Минск, 2025. С. 80–81.
6. Justification of Encryption Algorithm for Systems Monitoring Personnel Condition of Critical Informatization Objects / O. Boiprav [et al.] // Problems of Information Technology. 2024. Vol. 15, No 2. P. 3–8.

Поступила 27.02.2026

Принята в печать 09.03.2026

Доступна на сайте 10.07.2026

References

1. Magomedov S. G. (2020) Security Analysis of Computer Networks and Applications of the Healthcare Organizations Information Processes. *Cloud of Science*. 7 (3), 685–704 (in Russian).
2. Ryabko B. Ya., Fionov A. N. (2018) *Cryptography in the Information World*. Moscow, Hot Line – Telecom (in Russian).
3. Khan A. A., Por L. Y. (2024) Special Issue on Information Security and Cryptography: The Role of Advanced Digital Technology. *Applied Sciences*. 14 (5). DOI: 10.3390/app14052045.
4. Zelmanski O. B., Petrov S. N., Fomin D. A. (2025) On the Issue of Data Protection in Medical Biotechnical Systems. *Technical Means of Information Protection, Proceedings of the XXIII Belarusian-Russian Scientific and Technical Conference, Minsk, April 8*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 168–171 (in Russian).
5. Zelmanski O. B. (2025) Ensuring the Protection of Medical Data in Biotechnical Systems. *Modern Means of Communication, Proceedings of the XXX International Scientific and Technical Conference, Minsk, Oct. 30–31*. Minsk. 80–81 (in Russian).
6. Boiprav O., Zelmanski O., Hasanov M., Makarenya E. (2024) Justification of Encryption Algorithm for Systems Monitoring Personnel Condition of Critical Informatization Objects. *Problems of Information Technology*. 15 (2), 3–8.

Received: 27 February 2026

Accepted: 9 March 2026

Available on the website: 10 July 2026

Вклад авторов

Зельманский О. Б. выполнил исследования, интерпретировал полученные результаты, подготовил рукопись статьи.

Богуш В. А. осуществил постановку задачи для проведения исследования, рассмотрел рукопись статьи.

Authors' contribution

Zelmanski O. carried out the research, interpreted the results obtained, and prepared the manuscript of the article.

Bogush V. formulated the problem for the study and reviewed the manuscript.

Сведения об авторах

Зельманский О. Б., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Богуш В. А., д-р физ.-мат. наук, проф., ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-58
E-mail: 7650772@rambler.ru
Зельманский Олег Борисович

Information about the authors

Zelmanski O., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Bogush V., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-58
E-mail: 7650772@rambler.ru
Zelmanski Oleg



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-35-43>

УДК 004.942

ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА СОЗДАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

И. В. ТИМОШКЕВИЧ

*Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассмотрена задача разработки алгоритма создания компьютерной имитационной модели (цифрового двойника) для комплексной оценки энергетической и экономической эффективности конструктивных решений и инженерных систем жилых зданий. Представлен управляемый и воспроизводимый инструмент, позволяющий на стадии проектирования проводить виртуальные эксперименты, сравнивать альтернативы и обосновывать оптимальные варианты решений. Предлагаемый алгоритм систематизирует сбор и объединение различных данных – от архитектурных чертежей и теплотехнических характеристик до параметров инженерных систем и экономических показателей – в единую модель. Получен инструмент, минимизирующий риски и снижающий эксплуатационные расходы. Алгоритм позволит жилищно-коммунальным хозяйствам и другим управляющим организациям проводить онлайн-мониторинг, удаленно управлять и контролировать состояние зданий.

Ключевые слова: компьютерная имитационная модель, цифровой двойник, энергетическая эффективность, алгоритм проектирования, оптимизация проектных решений, жилые здания, теплотехнический расчет.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Тимошкевич, И. В. Обоснование разработки алгоритма создания компьютерной имитационной модели для оценки энергетической и экономической эффективности инженерных систем жилых зданий / И. В. Тимошкевич // Цифровая трансформация. 2026. Т. 32, № 2. С. 35–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-35-43>.

JUSTIFICATION FOR THE DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR CREATING A COMPUTER SIMULATION MODEL FOR ASSESSING THE ENERGY AND ECONOMIC EFFICIENCY OF ENGINEERING SYSTEMS OF RESIDENTIAL BUILDINGS

IVAN TSIMASHKEVICH

*Institute of Housing and Public Utilities of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. This article examines the development of an algorithm for creating a computer simulation model (digital twin) for a comprehensive assessment of the energy and economic efficiency of design solutions and utility systems in residential buildings. A manageable and reproducible tool is presented that enables virtual experiments, comparison of alternatives, and justification of optimal solutions during the design stage. The proposed algorithm systematizes the collection and integration of various data – from architectural drawings and thermal performance data to utility system parameters and economic indicators – into a single model. The resulting tool minimizes risks and reduces operating costs. The algorithm will enable housing and utility companies and other management organizations to conduct online monitoring, remotely manage, and control the condition of buildings.

Keywords: computer simulation model, digital twin, energy efficiency, design algorithm, optimization of design solutions, residential buildings, thermal engineering calculation.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interests.

For citation. Tsimashkevich I. (2026) Justification for the Development of an Algorithm for Creating a Computer Simulation Model for Assessing the Energy and Economic Efficiency of Engineering Systems of Residential Buildings. *Digital Transformation*. 32 (2), 35–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-35-43> (in Russian).

Введение

В современном строительстве приоритет отдается устойчивому развитию и экономии ресурсов (электроэнергии, водоснабжения), достижению максимальной энергетической и экономической эффективности жилых зданий. Растущие тарифы на энергоресурсы в сочетании с ужесточением экологических норм диктуют необходимость оптимизации энергопотребления и минимизации эксплуатационных издержек на всех этапах жизненного цикла строительного объекта. Поэтому ключевую роль приобретает внедрение комплексных компьютерных имитационных моделей, глубоко интегрированных с передовыми технологиями информационного моделирования зданий (Building Information Model, BIM) [1]. Такие модели позволяют проводить точный анализ как несущих, так и ограждающих конструкций, собрать данные о строительном объекте в онлайн-режиме и рассчитать энергетическую эффективность здания с помощью полученной от умных устройств (IoT-датчиков тепла и счетчиков воды) информации [1].

Несмотря на то что строительные компании осознают важность цифровизации, отрасль сталкивается с рядом фундаментальных проблем, затрудняющих эффективное внедрение имитационного моделирования. Во-первых, многие важные данные о проектах часто рассредоточены по разным источникам и форматам, а часть информации до сих пор существует только в бумажном виде. Это создает информационный вакуум и препятствует оперативному доступу к единой версии документа для проектировщиков, инженеров и управляющих компаний. Во-вторых, современные строительные задачи чрезвычайно сложны и требуют учета множества взаимосвязанных критериев (теплотехнических характеристик, прочности материалов, стоимости, энергоэффективности, надежности инженерных систем и т. д.), что крайне затруднительно при традиционных подходах. В-третьих, нехватка времени и отсутствие структурированных данных (неполные данные) вынуждают принимать решения в условиях неопределенности, что приводит к ошибкам в проектах, перерасходу бюджета и увеличению эксплуатационных расходов.

Научная новизна предлагаемой разработки заключается в алгоритмическом подходе, направленном на создание комплексной компьютерной имитационной модели для всесторонней оценки энергетической и экономической эффективности жилых зданий. Отличительная особенность данного решения – системная интеграция разнородных данных (геометрической информации из BIM-моделей, теплотехнических характеристик материалов, параметров инженерных систем и экономических показателей) в единую логическую структуру цифрового двойника [2, 3]. В статье приведена последовательность взаимосвязанных этапов, обеспечивающих воспроизводимый переход от сбора и валидации (проверка на истинность) исходных данных к многокритериальному анализу и оптимизации проектных решений, что способствует формализации процесса принятия решений в условиях многофакторности и неопределенности.

Обоснование необходимости разработки алгоритма

Для устранения выявленных противоречий предлагается методика комплексной оценки энергетической эффективности, основанная на программно-аппаратном комплексе компьютерного моделирования здания. Рассмотрен программный продукт, в котором можно будет создавать детализированные цифровые двойники зданий, включающие трехмерную модель здания, калькулятор энергоэффективности для расчета теплотерь и полную базу данных технических характеристик объекта. Такая программа позволит не только анализировать текущие данные, но и проводить виртуальные испытания, рассчитывать энергоэффективность от внедрения новых параметров конструктивных элементов (стен, окон, дверей), предсказывать потребление энергии и оценивать экономическую целесообразность от проведения тепловой модернизации и капитальных ремонтов. Учитывая сложность, многомерность и взаимозависимость решаемых проблем, крайне важно внедрить строгую систематизацию и четкую регламентацию всего процесса. Разработка детального рабочего алгоритма обусловлена следующими важными факторами [4–6]:

– громоздкие и многогранные задачи превращаются в понятную последовательность этапов, начиная с исходных данных (сбор данных) и заканчивая проверкой (верификацией), расчетом и анализом результатов;

– гарантируется четкий порядок действий: специалисты, инженеры, проектные группы следуют единой методологии, что обеспечивает сравнимость и достоверность результатов для разных объектов (типовых серий жилых зданий);

– исключается вероятность пропуска критически важных шагов (например, проверки модели на реальных данных), что напрямую влияет на точность конечных расчетов, т. е. алгоритм – надежный инструмент контроля;

– определение сроков, выделение ответственных лиц, что позволяет получать ожидаемые результаты для каждого этапа, эффективно распределять время и трудозатраты на проект, обеспечивая его выполнение в установленные сроки.

Алгоритм работы программного комплекса

При создании программно-аппаратного комплекса (ПАК) «Имитационная модель многоквартирного здания с калькулятором энергоэффективности» сформирован алгоритм его работы для использования строительными и управляющими компаниями. Блок-схема алгоритма работы ПАК, приведенная на рис. 1, включает следующие ключевые аспекты:

– обработку трехмерных моделей – обеспечение взаимодействия с 3D-представлением объектов недвижимости с возможностью визуализации и пространственного анализа;

– оценку энергоэффективности – автоматизированный расчет показателей энергопотребления и теплопотерь на основе математических моделей и нормативных данных;

– управление строительными характеристиками – система ввода, верификации и хранения параметров зданий в структурированном формате;

– интеграцию с IoT-устройствами – поддержка подключения распределенных датчиков мониторинга для сбора телеметрии в реальном времени;

– генерацию аналитических графиков – построение динамических визуализаций на основе обработанных данных с применением методов статистического анализа умных устройств.

Входные данные системы включают:

– выбор существующего объекта недвижимости из базы данных (БД) или регистрацию нового;

– ввод технико-эксплуатационных параметров здания через стандартизированные формы;

– автоматизированную загрузку дополнительных данных из внешних источников, включая BIM-системы и IoT-устройства.

Программный комплекс построен на событийно-ориентированной архитектуре, которая обрабатывает действия пользователя в графическом интерфейсе. При запуске все части интерфейса инициализируются – это панели визуализации, элементы управления и модуль для расчета энергоэффективности. В это же время из JSON-конфигурационного файла загружаются данные пользователя и системы, чтобы сохранить введенную ранее информацию и обновить базу моделей зданий вместе с их характеристиками. ПАК устроен так, чтобы можно было централизованно управлять БД жилых объектов. Пользователь может добавлять, менять или удалять как стандартные серии зданий, так и отдельные многоквартирные дома. Когда создается новый объект, то вводятся основные данные (адрес, количество этажей, конструкция и инженерные особенности), привязываются картинки и техдокументация. При удалении объекта его записи удаляются из базы, но при этом есть возможность вернуть набор стандартных серий. Такой подход делает программу гибкой и удобной для работы в жилищно-коммунальных организациях, таких как ЖРЭУ и управляющие компании, где нужно учитывать и типовые, и отдельные объекты.

Главное в работе системы – выбор пользователем либо стандартной серии здания, либо конкретного объекта из БД. После этого загружается визуальное изображение объекта в виде GIF-анимации или интерактивной 3D-модели. Если пользователь переключается в режим трехмерной визуализации, запускается специальный модуль рендеринга, который помогает рассмотреть пространственную структуру здания и его конструктивные особенности. Далее пользователь может просмотреть характеристики выбранного объекта. Здесь показываются структурированные данные – информация о конструктивных элементах, об инженерных системах, эксплуатационных параметрах, а также вложенные технические и проектные документы. Отдельная часть системы работает с данными, поступающими от IoT-устройств, встроенных в инфраструктуру здания.

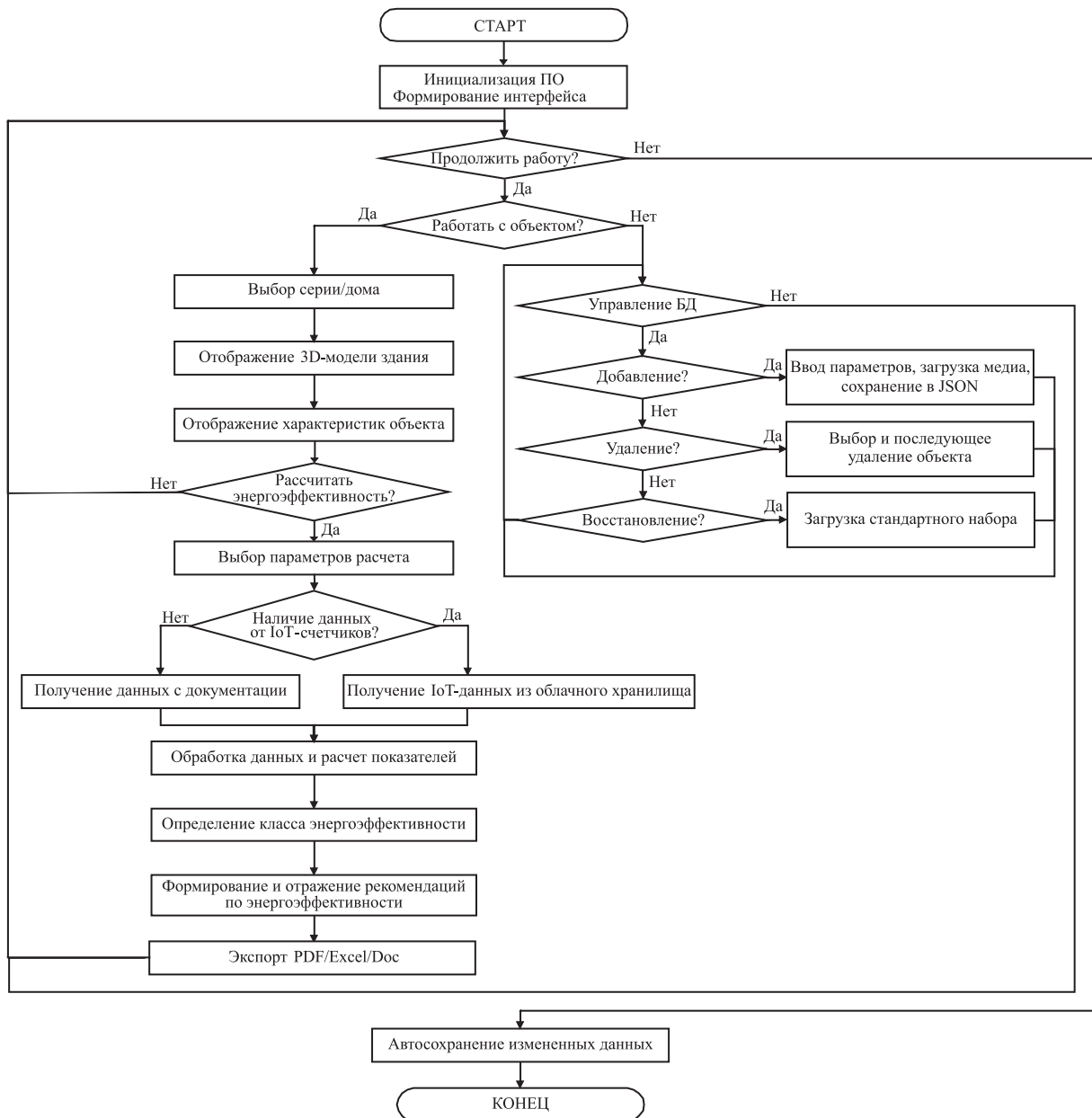


Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы программно-аппаратного комплекса
Fig. 1. Block diagram of the operating algorithm of the hardware and software complex

Основой ПАК является модуль расчета энергоэффективности (калькулятор энергоэффективности), алгоритм работы которого предусматривает два альтернативных сценария формирования исходных данных. В случае отсутствия в здании IoT-счетчиков исходные параметры определяются на основе документации, предоставляемой организациями теплоснабжения и водоснабжения, эксплуатирующими жилой фонд. Указанные данные могут включать как нормативные, так и фактические показатели потребления энергоресурсов, и используются в качестве базы для проведения расчетов.

При наличии IoT-счетчиков реализуется автоматизированный механизм получения данных из облачного хранилища, что позволяет использовать актуальные значения параметров энергопотребления, температуры, влажности и других эксплуатационных показателей. Применение такого подхода обеспечивает повышение точности и достоверности результатов расчетов за счет использования фактических данных в режиме, близком к реальному времени.

После формирования исходного набора данных осуществляется их предварительная обработка, включающая приведение различных единиц измерения к унифицированному виду. Далее

выполняется вычисление ключевых показателей, характеризующих энергетическую эффективность здания, в том числе удельного и общего энергопотребления, показателей энергопотребления в расчете на одну квартиру и стоимость эксплуатации. На основании полученных значений производится классификация объекта по уровню энергоэффективности в соответствии с установленными критериями. Результаты расчетов сохраняются во внутренней структуре данных ПАК и отображаются пользователю в структурированном виде. Дополнительно обеспечивается возможность формирования аналитических выводов и рекомендаций, направленных на повышение энергоэффективности здания, включая мероприятия по модернизации инженерных систем и снижению теплопотерь. В программе реализован механизм экспорта результатов в форматы отчетной документации, такие как PDF и табличные форматы, что обеспечивает интеграцию ПАК в существующие процессы документооборота.

Разработанный программный комплекс ориентирован на практическое внедрение в деятельность эксплуатирующих организаций жилищно-коммунального хозяйства, включая ЖРЭУ и управляющие компании. Его применение позволит автоматизировать процессы сбора, анализа и интерпретации данных о состоянии жилого фонда, а также повысить обоснованность принимаемых управленческих решений в области энергосбережения.

Таким образом, алгоритм работы ПАК представляет собой интегрированную систему, объединяющую средства визуализации объектов, управления БД зданий и интеллектуального анализа энергоэффективности с использованием как традиционных источников информации, так и современных IoT-технологий, что обеспечивает комплексный подход к оценке и оптимизации эксплуатационных характеристик жилых зданий. В ходе разработки программы была создана имитационная параметрическая 3D-модель типового жилого здания, интегрирующая архитектурные, конструктивные и инженерные решения. На рис. 2 и 3 показаны интерфейсы программного продукта и калькулятора энергоэффективности многоквартирного здания соответственно, на рис. 4 – меню характеристики серии здания с описанием параметров объекта. Модель алгоритма позволяет проводить визуальный анализ объектов и оценивать различные варианты их модернизации.

Разработанный программный продукт привел к созданию внутри него передового решения для управления энергоэффективностью зданий, состоящего из следующих ключевых компонентов:

- интеллектуальный алгоритм расчета энергоэффективности «Калькулятор энергоэффективности здания». Калькулятор позволяет точно определить класс энергоэффективности здания согласно действующим стандартам, рассчитать тепловые потери через все ограждающие конструкции и проанализировать, как распределяется потребление энергии по разным видам ресурсов. Необходимые условия для расчета (эксплуатационные характеристики здания (техпаспорт), данные из расчетно-справочного центра о затратах на подогрев горячей воды и о затратах тепловой энергии на обогрев здания за календарный год) следует брать у эксплуатирующих компаний;
- база данных обеспечивает удобное хранение и доступ к информации о строительных конструкциях, параметрах инженерных систем, а после внедрения в программный продукт умных датчиков позволит отслеживать динамику энергопотребления тепловой энергии здания и расхода холодной и горячей воды;
- удобный, интуитивно понятный программный интерфейс, благодаря которому пользователи получают доступ к инструментам для визуализации имитационных 3D-моделей зданий, технической документации, проведения комплексных расчетов энергоэффективности и глубокой аналитической обработки данных.

Результаты разработки ПАК предоставляют практический инструментарий, который способствует оптимизации проектных решений на всех этапах жизненного цикла здания с обеспечением непрерывного мониторинга энергопотребления и анализа графиков потребления для формирования эффективной стратегии энергосбережения. Перспективы развития программного продукта в будущих исследованиях будут направлены на создание модуля прогнозирования эксплуатационных характеристик, интеграцию с современными IoT-системами (умными устройствами) для онлайн-мониторинга состояния энергетической эффективности здания.

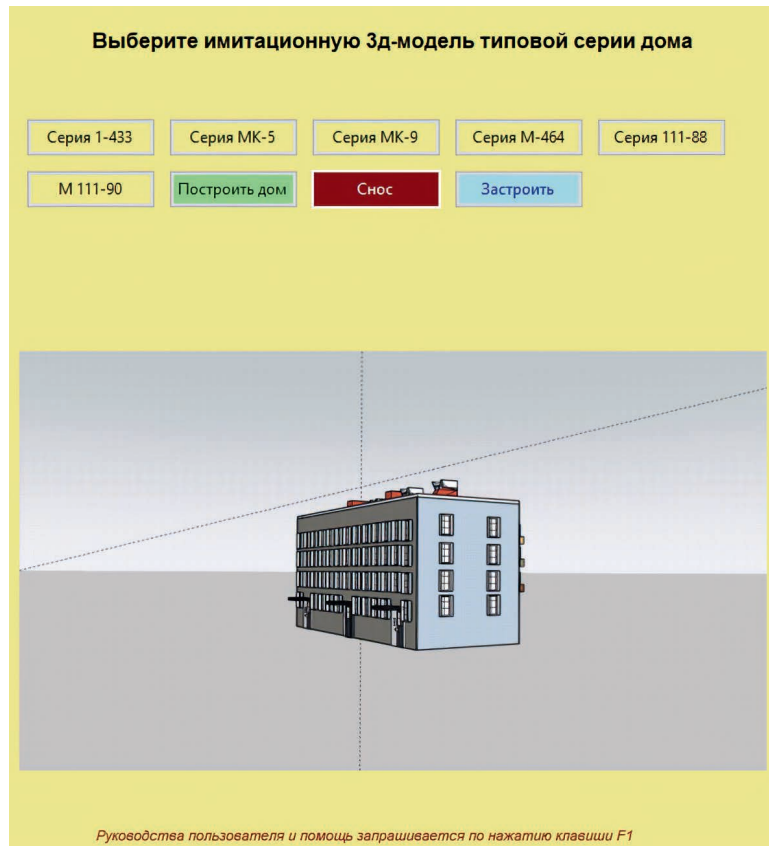


Рис. 2. Интерфейс программного продукта
Fig. 2. Software product interface

Калькулятор энергоэффективности Created by Timbiv

Тариф на тепловую энергию: 0,2099 RUB/kВт·ч | 1 Гкал = 1163 кВт·ч

Одиночный год Период (например, 2017-2018)

Год:

Серия дома:

Количество затраченной энергии на подогрев горячей воды (кВт·ч):

Затраты энергии на отопление (кВт·ч/м²):

Отапливаемая площадь здания (м²):

Отопительный период (дней):

Количество квартир:

Наружная температура (°C):

Внутренняя температура (°C):

Примечания

- ✓ Дельта температур рассчитывается автоматически: $\Delta t = t_{\text{внутр}} - t_{\text{наруж}}$
- ✓ Среднесуточное кол-во потребленной ТЭ = (Затраты на отопление * Площадь + ГВС) * Отопительный период
- ✓ Удельное суточное кол-во потребленной ТЭ = Среднесуточное * Отапливаемая площадь

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДЛЯ СЕРИЯ 1-433 ЗА 2026 ГГ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

- Энергия на подогрев ГВС: 80,00 кВт·ч/год

Рис. 3. Интерфейс калькулятора энергоэффективности многоквартирного здания
Fig. 3. Interface of the energy efficiency calculator for a multi-apartment building

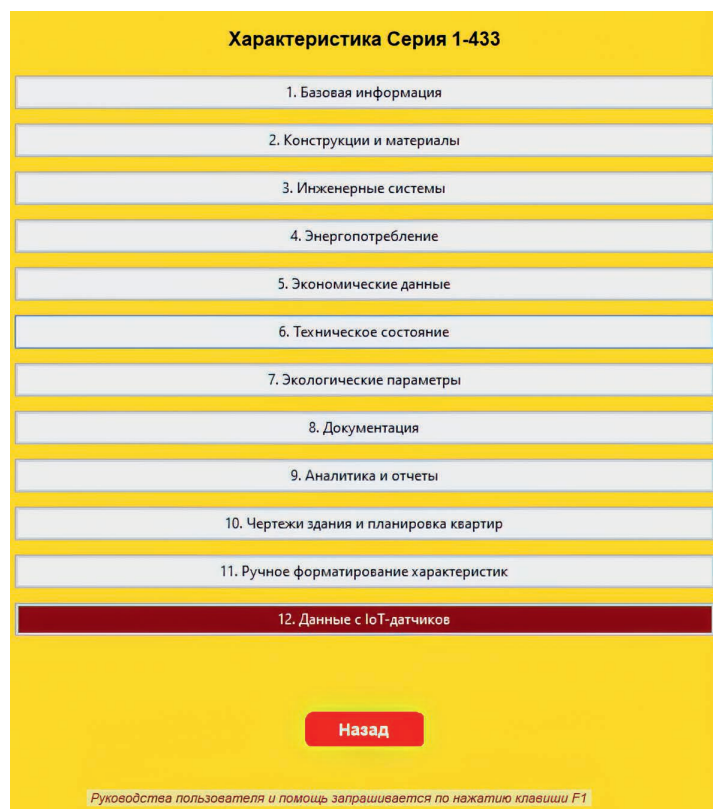


Рис. 4. Меню характеристики серии здания с описанием параметров серии
Fig. 4. Building series characteristics menu with description of series parameters

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные результаты подтверждают эффективность применения компьютерного моделирования для решения задач энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве и могут быть использованы при разработке цифровых двойников зданий. В условиях цифровой трансформации строительной отрасли создание программного комплекса для оценки энергоэффективности зданий – стратегически важное направление. Разработанный ПАК представляет собой не просто инструмент для расчетов, а целостную цифровую платформу, объединяющую технологии BIM, IoT [1] и большие данные (Big Data) [7]. Его внедрение позволит перевести процессы проектирования, эксплуатации и модернизации жилого фонда на качественно новый уровень, обеспечивая цифровизацию всего жизненного цикла зданий. Это переход от точечных решений к системному управлению энергопотреблением и формированию интеллектуальной среды для принятия удаленных управленческих решений.

Особую ценность предлагаемый программный комплекс представляет как основа для создания «умных» систем управления городской инфраструктурой [8, 9]. Интеграция расчетных модулей с данными реального мониторинга открывает возможности для:

- реализации аналитики для прогнозирования аварийных ситуаций. При установке умных датчиков (счетчиков) контроля водоснабжения есть возможность отслеживать протечки в онлайн-режиме, фиксировать уровень потерь воды;
- оптимизации капитальных затрат посредством анализа жизненного цикла строительных конструкций и затрат тепловой энергии на отопление, вентиляцию и подогрев горячей воды;
- автоматизации процедур энергоаудита и формирования отчетности внутри продукта, перевода информации в формат .doc или .excel.

Ключевым достижением исследования является разработанный интеллектуальный алгоритм, который не только классифицирует здания по уровню энергопотребления (от А+ до G), но и с высокой точностью рассчитывает теплопотери через ограждающие конструкции, а также детально анализирует структуру энергозатрат. Для хранения и обработки этих данных создана гибкая мо-

дульная база, включающая блоки по строительным характеристикам (материалы, износ), инженерным системам (отопление, вентиляция) и динамическому мониторингу энергопотребления.

Внедрение данного комплекса уже приносит ощутимые результаты: повышение точности прогнозирования эксплуатационных расходов на 15–20 % и ускорение процесса принятия решений по модернизации в 2–3 раза. В перспективе – развитие системы через интеграцию умных устройств и нейросетевых алгоритмов для адаптивного управления. Помимо компьютерного программного продукта, планируется создание мобильных решений для быстрой оценки зданий, мониторинга состояния в онлайн-режиме с любого устройства и разработки единого отраслевого стандарта цифрового паспорта здания.

Заключение

1. Разработанный программный комплекс представляет собой принципиально новый подход к управлению энергоэффективностью жилого фонда и сочетает в себе передовые технологии моделирования с практическими инструментами анализа. Его внедрение создаст основу для системной цифровизации отрасли: от разрозненных расчетов к комплексному управлению жизненным циклом, основанному на конкретных данных документации на здание. Внедрение комплекса – ключевой шаг к формированию интеллектуальной экосистемы «умного» жилого фонда, где каждое решение может начинаться с этапа проектирования и заканчиваться на этапе эксплуатации, а также внедряться непосредственно в уже эксплуатируемое здание.

2. Предлагаемый алгоритм значительно улучшит качество проектных решений, позволяя заранее предсказывать энергопотребление и затраты на протяжении всего срока службы здания, будет способствовать снижению эксплуатационных расходов, выполнению экологических стандартов и служить основой для формирования отраслевых стандартов цифрового проектирования энергоэффективных зданий. Полученные результаты открывают новые возможности для научных исследований в области устойчивого и зеленого строительства.

Список литературы

1. Тимошкевич, И. В. Основные принципы взаимодействия совместной работы BIM и IoT / И. В. Тимошкевич // Материалы Межвуз. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых специалистов имени Е. В. Армеевского. М.: Москов. ин-т электр. и матем. им. А. Н. Тихонова, Нац. исслед. ун-т «Высш. шк. экон», 2024. С. 155–159.
2. Змачинский, А. Э. Основы энергосбережения в строительстве [Электронный ресурс] / А. Э. Змачинский, О. Г. Галузо. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2007. Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/3672/osnovy_energoberezeniya_v_stroitelstve.pdf?sequence=1&isallowed=y. Дата доступа: 21.04.2025.
3. Тимошкевич, И. В. К вопросу повышения энергоэффективности многоквартирных жилых домов за счет применения технологии интернета вещей / И. В. Тимошкевич // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы: материалы III Междунар. науч. конф., Минск, 14 окт. 2024 г. Минск: Беларус. навука, 2025. С. 561–569.
4. Криштафович, А. К. Анализ алгоритмов принятия решений / К. Д. Криштафович, О. М. Внук, В. С. Плиски // 60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 22–26 апр. 2024 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2024. С. 606–607. Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/57592/1/Krishtafovich_Analiz.pdf. Дата доступа: 01.02.2026.
5. Кравчук, А. С. Введение в алгоритмизацию и программирование: учебные материалы для студентов специальности 6-05-0533-07 «Математика и компьютерные науки (по профилизациям)» / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук, Е. В. Кремень. Минск: Белор. гос. ун-т, 2023.
6. Зачем программисту алгоритмы? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/903368/>. Дата доступа: 01.02.2026.
7. Тимошкевич, И. В. Интеллектуальные системы мониторинга инженерных сетей: применение интернета вещей и аналитики больших данных для предотвращения протечек в многоквартирных домах / И. В. Тимошкевич // Big Data и анализ высокого уровня: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апр. 2025 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2025. С. 48–53.
8. Лобко, С. Сэкономим на ЖКУ? Белорусская разработка создает основу для «умных городов» [Электронный ресурс] / С. Лобко. Режим доступа: <https://smartpress.by/idea/tekhnologii/sekonomim-nazhku-belorusskaya-razrabotka-sozdaet-osnovu-dlya-umnykh-gorodov/>. Дата доступа: 01.02.2026.

9. Третьяк, М. В. Умные города как инструмент устойчивого развития: анализ технологий и перспективы внедрения в Беларуси / М. В. Третьяк // Электронные системы и технологии: сб. матер. 61-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 21–25 апр. 2025 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектр., 2025. С. 916–918.

Поступила 04.02.2026

Принята в печать 18.03.2026

Доступна на сайте 10.07.2026

References

1. Tsimoshkevich I. V. (2024) Basic Principles of BIM and IoT Interaction in Collaborative Work. *Proceedings of the Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates, and Young Specialists named after E. V. Armensky. Moscow, A. N. Tikhonov.* Moscow, Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics. 155–159 (in Russian).
2. Zmachinsky A. E., Galuzo O. G. (2007) *Fundamentals of Energy Saving in Construction.* Minsk, Belarusian National Technical University. Available: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/3672/osnovy_ehnergoberezeniya_v_stroitelstve.pdf?sequence=1&isallowed=y (Accessed 21 April 2025) (in Russian).
3. Tsimoshkevich I. V. (2025) On Improving the Energy Efficiency of Multi-Apartment Residential Buildings Through the Application of Internet of Things Technology. *Sustainable Development of the Energy Sector of the Republic of Belarus: Status and Prospects, Proceedings of the III International Scientific Conference, Minsk, Oct. 14.* Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 561–569 (in Russian).
4. Krishtafovich A. K., Vnuk O. M., Pliska V. S. (2024) Analysis of Decision-Making Algorithms. *60th Anniversary Scientific Conference of BSUIR Postgraduate, Master's, and Undergraduate Students, Apr. 22–26.* Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 606–607. Available: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/57592/1/Krishtafovich_Analiz.pdf (Accessed 1 February 2026) (in Russian).
5. Kravchuk A. S., Kravchuk A. I., Kremen E. V. (2023) *Introduction to Algorithmization and Programming: Educational Materials for Students of Specialty 6-05-0533-07 "Mathematics and Computer Science (by Specializations)".* Minsk, Belarusian State University (in Russian).
6. *Why Does a Programmer Need Algorithms?* Available: <https://habr.com/ru/articles/903368/> (Accessed 1 February 2026) (in Russian).
7. Tsimoshkevich I. V. (2025) Intelligent Engineering Networks Monitoring Systems: Application of the Internet of Things and Big Data Analytics for Leak Prevention in Multi-Apartment Buildings. *Big Data and High-Level Analysis: Collection of Scientific Papers from the XI International Scientific and Practical Conference, Minsk, Apr. 23–24.* Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 48–53 (in Russian).
8. Lobko S. (2026) *Saving on Utilities? A Belarusian Development Creates the Basis for "Smart Cities".* Available: <https://smartpress.by/idea/tekhnologii/sekonomim-na-zhku-belorusskaya-razrabotka-sozdaet-osnovu-dlya-umnykh-gorodov/> (Accessed 1 February 2026) (in Russian).
9. Tretiyak M. V. (2025) Smart Cities as a Tool for Sustainable Development: Analysis of Technologies and Prospects for Implementation in Belarus. *Electronic Systems and Technologies: Proceedings of the 61st Scientific Conference of Postgraduates, Master's Students and Students of BSUIR, Minsk, Apr. 21–25.* Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 916–918 (in Russian).

Received: 4 February 2026

Accepted: 18 March 2026

Available on the website: 10 July 2026

Сведения об авторе

Тимошкевич И. В., магистр экон. наук, асп. каф. электронных вычислительных машин, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; зав. сектором прикладного моделирования, Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси

Адрес для корреспонденции

220084, Республика Беларусь,
Минск, ул. Академика Купревича, 10, корп. 3
Институт жилищно-коммунального хозяйства
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 25 929-93-03
E-mail: tim6iv@gmail.com
Тимошкевич Иван Валерьевич

Information about the author

Tsimashkevich I., M. Sci. (Econ.), Postgraduate of the Department of Electronic Computers, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; Head of the Applied Modeling Sector, Institute of Housing and Public Utilities of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220084, Republic of Belarus,
Minsk, Academician Kuprevich St., 10, Build. 3
Institute of Housing and Public Utilities
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 25 929-93-03
E-mail: tim6iv@gmail.com
Tsimashkevich Ivan



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-44-52>

УДК 004.67, 004.85

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИПЕРПАРАМЕТРОВ НА ТОЧНОСТЬ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБОРА ДАННЫХ Fashion-MNIST

Д. М. КЛИМЕНКО, Е. И. КОЗЛОВА

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В настоящее время в области машинного обучения и искусственного интеллекта активно исследуются методы оптимизации и настройки гиперпараметров моделей. Одно из ключевых направлений таких исследований – анализ влияния изменения гиперпараметров, таких как количество слоев двумерной свертки (Conv2D) и их параметры (число фильтров, размер ядра), размер и шаг слоев максимальной подвыборки (MaxPooling2D), количество нейронов в полносвязных слоях, функции активации, размер пакета (batch_size) и количество эпох обучения, на точность предсказания модели. В статье приведен анализ влияния изменения количества слоев двумерной свертки, параметров слоев максимальной подвыборки (размер окна и шаг), количества нейронов в полносвязных слоях, выбора функции активации, размера пакета и числа эпох обучения на точность предсказания моделей машинного обучения на наборе данных Fashion-MNIST в архитектуре сверточной нейронной сети.

Ключевые слова: размер пакета, двумерная свертка, Fashion-MNIST, максимальная подвыборка, гиперпараметры, количество эпох обучения, количество фильтров, оптимизация гиперпараметров, точность предсказания, функции активации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Клименко, Д. М. Исследование влияния гиперпараметров на точность нейросетевого предсказания с использованием набора данных Fashion-MNIST / Д. М. Клименко, Е. И. Козлова // Цифровая трансформация. 2026. Т. 32, № 2. С. 44–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-44-52>.

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF HYPERPARAMETERS ON THE ACCURACY OF NEURAL NETWORK PREDICTIONS USING THE Fashion-MNIST DATASET

DANIIL KLIMENKA, ALENA KAZLOVA

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Machine learning and artificial intelligence (AI) are currently actively researching methods for optimizing and tuning model hyperparameters. One key area of research is analyzing the impact of varying hyperparameters, such as the number of two-dimensional convolution (Conv2D) layers and their parameters (number of filters, kernel size), the size and stride of maximum pooling (MaxPooling2D) layers, the number of neurons in fully connected layers, activation functions, batch size (batch_size), and the number of training epochs, on the prediction accuracy of machine learning models using a convolutional neural network architecture on the Fashion-MNIST dataset.

Keywords: batch size, 2D convolution, Fashion-MNIST, max pooling, hyperparameters, number of training epochs, number of filters, hyperparameter optimization, prediction accuracy, activation functions.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Klimenka D., Kazlova A. (2026) Investigation of the Impact of Hyperparameters on the Accuracy of Neural Network Predictions Using the Fashion-MNIST Dataset. *Digital Transformation*. 32 (2), 44–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-32-2-44-52> (in Russian).

Введение

Сегодня в области машинного обучения и искусственного интеллекта одно из ключевых направлений – анализ влияния изменения гиперпараметров на точность предсказания модели, например, с использованием набора данных Fashion-MNIST. Среди основных гиперпараметров – количество слоев Conv2D и их параметры (число фильтров, размер ядра), размер и шаг pooling-слоев, количество нейронов в полносвязных слоях (Dense), функции активации, размер пакета (batch_size) и количество эпох обучения [1, 2]. Fashion-MNIST содержит черно-белые изображения одежды и аксессуаров размерами 28×28 пикселей. Этот набор данных создан в 2017 г. исследователями из Zalando Research [3] как более сложная альтернатива классическому MNIST, содержащему изображения рукописных цифр.

Анализ влияния гиперпараметров на точность предсказания моделей на наборе данных Fashion-MNIST – актуальная задача, которая позволит улучшить результаты обучения и оптимизировать процесс построения моделей машинного обучения. Исследование влияния гиперпараметров на точность предсказания с использованием Fashion-MNIST не только расширит знания в области машинного обучения, но и улучшит качество работы моделей, повысив их эффективность в задачах классификации изображений.

Изменяемые гиперпараметры

Fashion-MNIST содержит 70 тыс. изображений в 10 категориях одежды. На каждом изображении – по одному предмету одежды в низком разрешении (28×28 пикселей). В Fashion-MNIST используется 60 тыс. изображений для обучения нейронной сети и 10 тыс. изображений для тестирования (чтобы проверить, насколько правильно сеть обучилась их классифицировать). Этот набор данных можно сразу загрузить из библиотеки TensorFlow, поскольку он входит в ее состав.

Для исследований была выбрана следующая архитектура нейронной сети: два сверточных слоя Conv2D с 32 и 64 фильтрами соответственно; размер ядер обоих слоев (3, 3); два pooling-слоя с шагом на первом (3, 3) и на втором – (2, 2); размер окна объединения в первом слое (3, 3) и на втором (2, 2); 128 нейронов в полносвязном слое; функция активации ReLU (Rectified Linear Unit); размер пакета – 32; количество эпох обучения – 10 [4]. Выбранная архитектура (два слоя Conv2D, слой подвыборки и полносвязный слой на 128 нейронов) – классический пример сверточной сети средней глубины. Она содержит все ключевые компоненты, необходимые для извлечения признаков из изображений (свертка, pooling, нелинейная активация), но при этом не является избыточно сложной. Это позволяет четко отследить влияние изменений отдельных гиперпараметров, т. е. продемонстрировать, как их изменение сказывается на точности предсказания (повышение/снижение).

Исследовали влияние следующих гиперпараметров нейронной сети: количество слоев, участвующих в операции свертки Conv2D, и их параметры (число фильтров, размер ядра); размер и шаг pooling-слоев; количество нейронов в полносвязных слоях; функции активации; размер пакета; количество эпох обучения.

Алгоритм свертки Conv2D выбирает небольшую область изображения (ядро свертки) и умножает ее значения на веса фильтра. Проходя по всему изображению, он создает карту признаков, содержащую выявленные паттерны. Чем больше слоев Conv2D, тем глубже анализ изображения, но выше риск потери пространственной информации, увеличения вычислительной нагрузки и переобучения.

Размер и шаг pooling-слоев. Pooling – это процесс уменьшения изображения, чтобы сократить объем данных и сохранить ключевые признаки. Размер окна (pool_size) и шаг (strides) регулируют уровень уменьшения размерности. Баланс между размером окна и шагом важен для оптимального обучения нейронной сети.

Количество нейронов в полносвязных слоях. Полносвязные слои соединяют каждый нейрон текущего слоя со всеми нейронами следующего. Меньшее количество нейронов, например, 32 или 64, приводит к ускорению обучения нейронной сети, но снижает возможности для качественного анализа данных. Среднее количество нейронов 128 и 256 – баланс между вычислительной сложностью и точностью. Большее количество нейронов, например 512, обеспечивает глубокий анализ данных, но требует больше ресурсов и повышает риск переобучения. В последнем слое нейронной сети принимается решение о классификации.

Функции активации – это ключевой элемент нейронных сетей, который определяет, какие нейроны будут активны. Они помогают модели создавать нелинейные зависимости между входными и выходными данными. Перечислим типы функций активации, использованных в исследовании:

– ReLU: ускоряет обучение, предотвращает проблемы исчезающего градиента; используется в слоях Conv2D и Dense:

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{если } x > 0; \\ 0, & \text{если } x \leq 0; \end{cases} \quad (1)$$

– Leaky ReLU (улучшенный ReLU): предотвращает мертвые нейроны:

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{если } x > 0; \\ \alpha x, & \text{если } x \leq 0; \end{cases} \quad (2)$$

– Sigmoid: преобразует значения в диапазон от 0 до 1, удобно для бинарных задач; может вызывать затухание градиента в глубоких сетях:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}; \quad (3)$$

– Tanh (гиперболический тангенс): выдает значения от (-1) до 1, улучшая передачу информации; хорошо работает, если входные данные нормализованы:

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}; \quad (4)$$

– Softmax (для многоклассовых задач – в Fashion MNIST 10 классов): преобразует выходные значения в вероятности, чтобы выбрать лучший класс; используется в последнем слое для классификации:

$$f(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_j e^{x_j}}. \quad (5)$$

Batch_size (выборка) – параметр, используемый в машинном обучении, который определяет количество обучающих примеров, обрабатываемых моделью за один шаг обучения. Влияет на скорость обучения, использование памяти и стабильность градиентного спуска. Выбор оптимального *batch_size* зависит от доступных вычислительных ресурсов и специфики задачи. Малые значения выборки могут привести к нестабильности обучения, а слишком большие – к увеличению времени обработки и потребления памяти.

Эпоха обучения – это один полный проход всех обучающих данных через модель машинного обучения. Во время обучения нейронной сети количество эпох определяет, сколько раз модель будет проходить через обучающий набор данных, что позволяет ей постепенно улучшать свои параметры и снижать ошибку предсказания. Однако выбор слишком большого или слишком малого количества эпох может привести к переобучению или недообучению соответственно [5].

Проведение экспериментов с изменением гиперпараметров

В базовой модели, относительно которой проводилось исследование, точность нейросетевого предсказания составляла 91 % при двух сверточных слоях с 32 и 64 фильтрами. В процессе экспериментов анализировались результаты изменения различных гиперпараметров.

Изменение количества слоев и ядер в Conv2D. Добавление сверточных слоев может привести как к извлечению более глубоких признаков и повышению качества работы сети, так и к переобучению. Уменьшение числа слоев свертки также имеет свои преимущества и недостатки. При изменении количества слоев Conv2D от одного до трех получены следующие результаты:

- при добавлении третьего слоя (128 фильтров) точность нейросетевого предсказания уменьшилась и составила 89 %;
- уменьшение количества слоев до одного (32 фильтра) привело к точности нейросетевого предсказания 92 %.

Для определения влияния размерности ядра на качество распознавания были выбраны значения размерности ядра (3,3), (5,5) и (7,7). При этом учитывалось, что размерность ядра (3,3) является широко используемой, поскольку хорошо выделяет мелкие детали, такие как линии и углы, (5,5) анализирует более крупные текстуры, а (7,7) позволяет глубже изучить общие формы, но приводит к потере мелких деталей. Полученные в базовой модели значения при изменении числа фильтров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость точности работы сети от размерности ядер при двух Conv2D-слоях
Table 1. Dependence of network performance accuracy on kernel values with two Conv2D layers

Ядро		Точность предсказания, %
первого слоя с 32 фильтрами	второго слоя с 64 фильтрами	
(3,3)	(3,3)	91
(5,5)	(5,5)	91
(7,7)	(7,7)	90
(3,3)	(5,5)	91
(3,3)	(7,7)	91
(5,5)	(3,3)	92
(5,5)	(7,7)	91
(7,7)	(3,3)	90
(7,7)	(5,5)	89

В модели с уменьшенным количеством слоев (один слой с 32, 64 и 128 фильтрами) получены результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость точности работы сети от размерности ядер при одном Conv2D-слое с 32, 64 и 128 фильтрами

Table 2. Dependence of the network accuracy on the kernel size for one Conv2D layer with 32, 64, and 128 filters

Ядро одного слоя	Точность предсказания, %
С 32 фильтрами	
(3,3)	92
(5,5)	91
(7,7)	91
С 64 фильтрами	
(3,3)	91
(5,5)	91
(7,7)	90
Со 128 фильтрами	
(3,3)	92
(5,5)	91
(7,7)	91
(9,9)	91

Изменение размера окна объединения (*pool_size*) и шага перемещения окна (*strides*) pooling-слоев (*MaxPooling2D*). Результаты точности работы сети при изменении шага перемещения окна при размере окон объединения в первом и во втором слоях, равном (2,2) и (2,2) соответственно, представлены в табл. 3. Изменение размера окна объединения (*pool_size*) в базовой модели, в которой шаг перемещения окна не указан, по умолчанию принимает значение *pool_size*, как показано в табл. 4.

Таблица 3. Зависимость точности работы сети от шагов перемещения в pooling-слоях
Table 3. Dependence of network performance accuracy on movement steps pooling layers

Шаг перемещения		Точность предсказания, %
в первом слое	во втором слое	
(3,3)	(2,2)	91
(3,3)	(1,1)	91
(3,3)	(3,3)	89
(2,2)	(1,1)	92
(2,2)	(2,2)	91
(2,2)	(3,3)	91
(1,1)	(2,2)	92
(1,1)	(3,3)	92
(1,1)	(1,1)	92

Таблица 4. Зависимость точности работы сети от размеров окон объединения в pooling-слоях
Table 4. Dependence of network performance accuracy on pooling windows in pooling layers

Размер окна объединения		Точность предсказания, %
в первом слое	во втором слое	
(3,3)	(2,2)	91
(3,3)	(1,1)	91
(3,3)	(3,3)	90
(2,2)	(1,1)	92
(2,2)	(2,2)	91
(2,2)	(3,3)	91
(1,1)	(2,2)	92
(1,1)	(3,3)	92
(1,1)	(1,1)	91

Исследование влияния количества нейронов в полносвязных слоях (Dense) на точность предсказания в базовой модели. Количество нейронов изменялось от 32 до 512. Предполагалось, что увеличение числа нейронов приведет к повышению точности предсказания, т. е. к способности модели аппроксимировать сложные функции. Однако при этом может произойти переобучение, т. е. модель не будет способна распознавать новые данные при высоком качестве распознавания данных обучающей выборки. Результаты исследований приведены в табл. 5.

Таблица 5. Зависимость точности работы сети от количества нейронов в полносвязных слоях
Table 5. Dependence of network accuracy on the number of neurons in fully connected layers

Количество нейронов	32	64	128	256	512
Точность предсказания, %	90	90	91	91	92

Изменение функции активации. Зависимость точности работы сети от выбранной функции активации приведена в табл. 6.

Таблица 6. Зависимость точности работы сети от выбранной функции активации
Table 6. Dependence of network accuracy on the selected activation function

Функция активации	ReLU	Sigmoid	Tanh	Leaky ReLU
Точность предсказания, %	92	91	91	91

Изменение размера пакета и количества эпох. Зависимости точности работы сети от количества эпох обучения нейронной сети и точности предсказания при значениях выборки (*batch_size*) с 32, 64 и 128 фильтрами приведены в табл. 7.

Таблица 7. Зависимость точности работы сети от количества эпох обучения нейронной сети при значениях выборки с 32, 64 и 128 фильтрами

Table 7. Dependence of the network accuracy on the number of neural network training epochs for sample values with 32, 64 and 128 filters

batch_size = 32					
Количество эпох	10	20	30	40	50
Точность предсказания, %	91	91	91	91	90
batch_size = 64					
Количество эпох	10	20	30	40	50
Точность предсказания, %	92	91	91	91	91
batch_size = 128					
Количество эпох	10	20	30	40	50
Точность предсказания, %	91	91	91	91	91

Сравнение результатов и анализ влияния каждого гиперпараметра на точность предсказания

Изменение количества слоев и ядер в Conv2D. В базовой модели было два сверточных слоя с 32 и 64 фильтрами, и точность нейросетевого предсказания составляла 91 %, а при добавлении третьего слоя уменьшилась до 89 %. Такое понижение для набора данных Fashion-MNIST может иметь несколько объяснений:

- при добавлении третьего слоя, который способен выделять более сложные и абстрактные признаки изображений, во избежание переобучения может потребоваться больше данных в обучающей выборке, что при балансе обучающей и тестовой выборок в исследуемом датасете представляется невозможным;

- при добавлении дополнительного слоя может возникнуть проблема потери информации, поскольку дополнительный слой извлекает ненужные или нерелевантные признаки изображения, что и сказывается негативно на точности предсказания;

- добавление третьего слоя увеличивает сложность модели, что также может привести к переобучению, особенно, если количество данных для обучения недостаточно.

Увеличение точности предсказания при использовании уменьшенного количества слоев (один слой с 32 фильтрами и один – с 128 фильтрами; оба слоя с размером ядер (3,3)) может быть объяснено тем, что упрощение модели улучшает ее обобщающую способность и помогает избежать переобучения. Комбинация размеров ядер (5,5) и (3,3) позволила модели лучше захватывать различные уровни деталей в изображениях, что привело к повышению точности предсказания.

Изменение размера окна объединения и шага перемещения окна pooling-слоев (MaxPooling2D). Исследования проводились при фиксированном размере окна и разных шагах его перемещения, а также при фиксированном шаге перемещения изменялся размер окна. При базовом размере окна и шаге перемещения (2,2) в первом слое и (1,1) во втором точность предсказания составила 92 %. В случае с шагами перемещения (3,3) в первом слое и (3,3) во втором точность предсказания – 89 %. Во всех остальных комбинациях точность предсказания не отличалась от базовой модели и составляла 91 %.

При изменении размера окна объединения и сохранении величины шага неизменной точность предсказания колебалась в пределах 90–92 %. Наиболее высокая точность достигалась при размере окна (2,2) в первом слое и (1,1) во втором, при размере окна (1,1) в первом слое и (2,2) во втором, а также при размере окна (1,1) в первом слое и (3,3) во втором. Таким образом, для данной архитектуры нейронной сети на наборе данных Fashion-MNIST выбор шага перемещения (2,2) на первом слое и (1,1) на втором, а также вышеуказанных размеров окна объединения является наилучшим выбором с точки зрения точности предсказания.

Влияние количества нейронов в полносвязных слоях на точность предсказания в базовой модели. При изменении количества нейронов в полносвязных слоях наблюдалось следующее

влияние на точность предсказания модели: при 32 и 64 нейронах точность предсказания составила 90 %. При дальнейшем увеличении количества нейронов до 128 и 256 она увеличилась до 91 %, а при 512 нейронах наблюдалась наивысшая точность предсказания – 92 %. Увеличение количества нейронов в полносвязных слоях имеет положительное влияние на точность предсказания модели. Это обусловлено тем, что большее количество нейронов позволяет модели извлекать более сложные зависимости из данных. Так, при 512 нейронах достигается наивысшая точность предсказания, что указывает на предпочтительное использование этого значения числа нейронов в рассматриваемой модели для набора данных Fashion-MNIST. Проведенные дополнительные исследования наличия переобучения не показали.

Изменение функции активации. Согласно данным, приведенным в табл. 6, можно сделать следующие выводы:

- функция активации ReLU показывает наивысшую точность предсказания – 92 %. Применение ReLU обычно является предпочтительным вследствие ее эффективности и способности к борьбе с проблемой затухания градиента;
- функции активации Sigmoid, Tanh и Leaky ReLU показывают сопоставимые результаты точности предсказания (91 %), но немного уступают ReLU в данном случае.

Таким образом, для архитектуры нейронной сети на наборе данных Fashion-MNIST функция активации ReLU является наилучшим выбором с точки зрения точности предсказания.

Изменение размера пакета и количества эпох. По результатам экспериментов с разными значениями количества эпох и размеров пакета для сверточной нейронной сети на наборе данных Fashion-MNIST можно сделать следующие выводы:

- для размера пакета с количеством нейронов 32 точность предсказания остается примерно на одном уровне (90–91 %) при увеличении количества эпох обучения от 10 до 50. В данном случае увеличении количества эпох не приводит к значительному улучшению точности распознавания;
- для размера пакета с количеством нейронов 64 наивысшая точность в 92 % достигается при 10 эпохах, затем она уменьшается до 91 % и остается на этом уровне при дальнейшем увеличении количества эпох от 20 до 50. Итак, увеличение размера пакета до 64 позволяет повысить точность при невысоком количестве эпох по сравнению с количеством нейронов, равным 32;
- для размера пакета с количеством нейронов 128 точность предсказания остается на одном уровне (91 %) при изменении количества эпох обучения от 10 до 50. То есть увеличение размера пакета до 128 не приводит к улучшению точности предсказания.

Таким образом, увеличение размера пакета до 64 при 10 эпохах обучения хоть и незначительно, но улучшает точность предсказания модели. Однако в целом для сверточной нейронной сети на наборе данных Fashion-MNIST количество эпох не имело существенного влияния на точность предсказания.

Определение оптимальных значений гиперпараметров

Оптимизация гиперпараметров играет важную роль в обучении нейронных сетей для достижения максимальной точности классификации на различных наборах данных. Для Fashion-MNIST были определены следующие оптимальные гиперпараметры.

Conv2D-слои. Первый Conv2D-слой с 32 ядрами размером (5,5) и функцией активации ReLU позволяет извлечь локальные пространственные признаки из изображений одежды, таких как текстуры и формы. Второй Conv2D-слой с 64 ядрами размером (3,3) дополнительно улучшает абстрактное представление признаков на более высоком уровне.

MaxPooling2D-слои. Первый MaxPooling2D-слой с $\text{pool_size} = (2,2)$ выполняет подвыборку признаков, что способствует уменьшению размера признаковых карт и повышению инвариантности к масштабу. Второй MaxPooling2D-слой с $\text{pool_size} = (1,1)$ помогает сохранить важные детали признаков для дальнейшей обработки.

Dense-слой. Полносвязный слой с 512 нейронами и функцией активации ReLU обеспечивает высокую емкость модели для изучения более сложных зависимостей в данных.

Архитектура модели. Использование модели Sequential с определенной последовательностью сверточных, пулинговых и плотных слоев обеспечивает ее эффективное обучение для задачи классификации Fashion-MNIST. Оптимальная архитектура модели приведена на рис. 1.

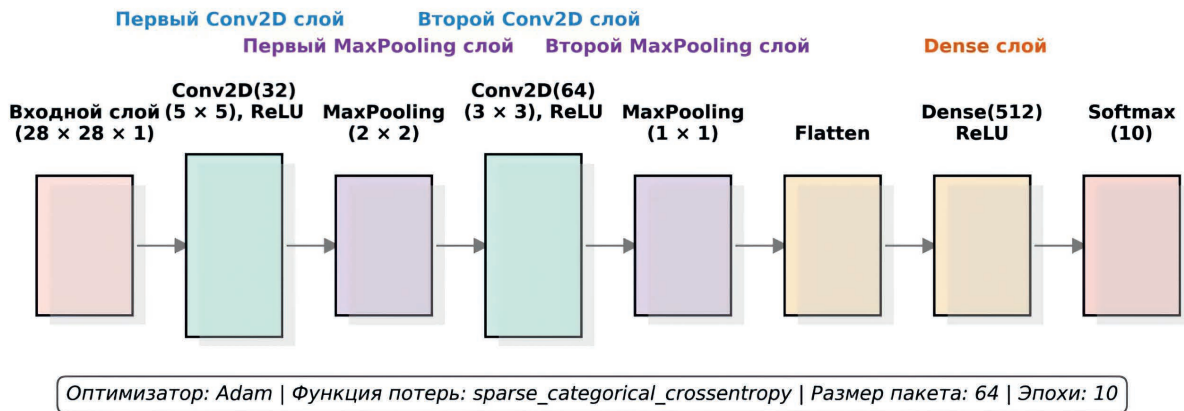


Рис. 1. Оптимальная архитектура модели
Fig. 1. Optimal model architecture

Оптимизатор и функция потерь. Оптимизатор Adam обладает хорошей скоростью сходимости и адаптивным шагом обучения, что способствует эффективной оптимизации весов модели. Функция потерь `sparse_categorical_crossentropy` применяется для многоклассовой классификации и помогает модели оценивать ошибку предсказаний.

Обучение модели. Обучение модели на 10 эпохах с размером пакета 64 обеспечивает достаточное количество итераций для настройки весов и обучения модели на данных Fashion-MNIST.

Перечисленные оптимальные гиперпараметры обеспечивают высокую точность классификации на наборе данных Fashion-MNIST (92 %) за счет эффективного извлечения признаков, адаптации модели к данным и оптимального обучения. Их подбор основан на тщательном анализе влияния каждого параметра на точность предсказания нейронной сети в процессе проведения эксперимента.

Заключение

1. Исследовано влияние гиперпараметров базовой модели сверточной нейронной сети на точность решения задачи классификации в датасете Fashion-MNIST. Рассмотрены такие параметры, как количество слоев, участвующих в операции свертки Conv2D; количество фильтров и размер ядра в каждом слое; размер и шаг pooling-слоев; количество нейронов в полносвязных слоях; функции активации; размер пакета; количество эпох обучения. Установлено, что наилучшая точность классификации достигается при следующих гиперпараметрах сети: первый Conv2D-слой с 32 ядрами размером (5,5) и функцией активации ReLU и второй Conv2D-слой с 64 ядрами размером (3,3); первый MaxPooling2D-слой с `pool_size = (2,2)` и второй MaxPooling2D-слой с `pool_size = (1,1)`; полносвязный слой с 512 нейронами и функцией активации ReLU; оптимизатор Adam и функция потерь `sparse_categorical_crossentropy`. Обучение модели оптимально проводить на 10 эпохах с размером пакета 64 для достижения наилучшей точности классификации.

2. Определены оптимальные значения приведенных гиперпараметров для достижения высшей точности предсказания и повышения обобщающей способности модели.

3. Полученные данные и выводы могут быть применены в таких областях, как компьютерное зрение, распознавание образов, анализ изображений и др.

4. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (подпрограмма «Фотоника и ее применение», задание 1.6.1), 2021–2025 гг., № ГР 20212701.

Список литературы

1. Клейнер, С. Г. Исследование точности решения задачи оптимизации гиперпараметров с помощью нейронной сети [Электронный ресурс] / С. Г. Клейнер. Режим доступа: <https://www.xn8sbempclcwd3bmt.xnplai/article/24427>. Дата доступа: 24.12.2025.
2. Игнатьева, С. А. Влияние выбора гиперпараметров при обучении сверточных нейронных сетей на точность повторной идентификации людей в системах видеонаблюдения [Электронный ресурс] / С. А. Игнатьева. Режим доступа: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/34506/1/163-167.pdf>. Дата доступа: 24.12.2025.

3. Fashion MNIST [Electronic resource]. Mode of access: <https://github.com/zalando-research/fashion-mnist>. Date of access: 24.12.2025.
4. Review of Deep Learning: Concepts, CNN Architectures, Challenges, Applications, Future Directions / L. Alzubaidi [et al.] // Journal of Big Data. 2021. Vol. 8, No 53. P. 2–74. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8>.
5. Murphy, K. P. Probabilistic Machine Learning: An Introduction / K. P. Murphy. USA: MIT Press, 2022. P. 323–358.

Поступила 27.02.2026

Принята в печать 09.03.2026

Доступна на сайте 10.07.2026

References

1. Kleiner, S. G. (2025) *Study of the Accuracy of Solving a Hyper Parameter Optimization Problem Using a Neural Network*. Available: <https://www.xn8sbempeclwd3bmt.xnp1ai/article/24427> (Accessed 24 December 2025) (in Russian).
2. Ignatieva S. A. (2025) *The Impact of Hyper Parameter Selection in Convolutional Neural Network Training on the Accuracy of Person Re-Identification in Video Surveillance Systems*. Available: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/34506/1/163-167.pdf> (Accessed 24 December 2025) (in Russian).
3. *Fashion MNIST*. Available: <https://github.com/zalando-research/fashion-mnist> (Accessed 24 December 2025) (in Russian).
4. Alzubaidi L., Zhang J., Humaidi A. J., Al-Dujaili A., Duan Ye, Al-Shamma O., et al. (2021) Review of Deep Learning: Concepts, CNN Architectures, Challenges, Applications, Future Directions. *Journal of Big Data*. 8 (53), 2–74. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8>.
5. Murphy K. P. (2022) *Probabilistic Machine Learning: An Introduction*. USA, MIT Press Publ. 323–358.

Received: 27 February 2026

Accepted: 9 March 2026

Available on the website: 10 July 2026

Вклад авторов

Клименко Д. М. провел экспериментальные исследования и разработку модели, участвовал в интерпретации результатов эксперимента и работе над текстом статьи.

Козлова Е. И. предложила концепцию работы, провела критический анализ модели и содержания статьи, подготовила рукопись статьи для публикации.

Authors' contribution

Klimenka D. conducted experimental research and development of the model, participated in the interpretation of the experimental results and work on the text of the article.

Kazlova A. proposed the concept of the work, conducted a critical analysis of the model and content of the article, prepared the manuscript for publication.

Сведения об авторах

Клименко Д. М., студ., Белорусский государственный университет

Козлова Е. И., канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. интеллектуальных систем, Белорусский государственный университет

Information about the authors

Klimenka D., Student, Belarusian State University

Kazlova A., Cand. Sci. (Phys. and Math.) Associate Professor, Head of the Department of Intelligent Systems, Belarusian State University

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 17 209-58-36
E-mail: kozlova@bsu.by
Козлова Елена Ивановна

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 17 209-58-36
E-mail: kozlova@bsu.by
Kazlova Alena