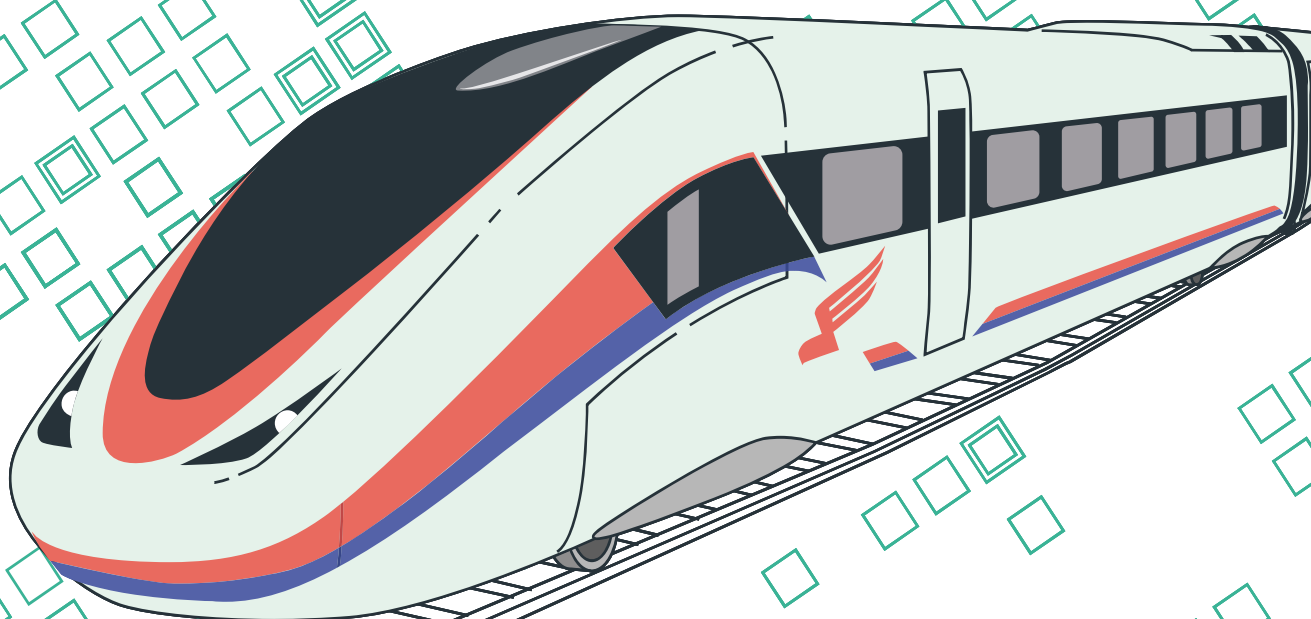


Интеллектуальные технологии на транспорте

Intellectual Technologies
on Transport



Выпуск 4
2025

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ
(сетевой электронный научный журнал)
Выпуск 4(44), 2025
ISSN 2413-2527

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет. Публикуются статьи на русском и английском языках с результатами исследований и практических достижений в области интеллектуальных технологий и сопутствующих им научных исследований. Журнал основан в 2015 году.

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024

Адрес редакции:

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Телефон: +7 (812) 457-86-06

Сетевое издание «Интеллектуальные технологии на транспорте (сетевой электронный научный журнал), Intellectual Technologies on Transport» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство Эл № ФС77-61707 от 07.05.2015.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Выпуски журнала доступны на сайте <http://itt-pgups.ru>

Периодичность выхода — 4 номера в год.

Хомоненко А. Д., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ — главный редактор

Божко Л. М., д. э. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ — заместитель главного редактора

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Сопредседатели редакционного совета:

Валинский О. С., к. т. н., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чаркин Е. И., зам. гендиректора по ИТ ОАО «РЖД», Москва, РФ

Ададуров С. Е., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Дудин А. Н., д. ф.-м. н., проф., БГУ, Минск, Беларусь
Корниенко А. А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Макаренко С. И., д. т. н., доц., ПАО «Интелтех», С.-Петербург, РФ
Меркурьев Ю. А., Dr. Habil., проф., член Латвийской АН, РТУ, Рига, Латвия
Титова Т. С., д. т. н., проф., первый проректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Александрова Е. Б., д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ
Басыров А. Г., д. т. н., проф., ВКА, С.-Петербург, РФ
Баталов Д. И., к. т. н., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Безродный Б. Ф., д. т. н., проф., НИИАС, Москва, РФ
Благовещенская Е. А., д. ф.-м. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ

Бубнов В. П., д. т. н., проф., С.-Петербург, РФ
Булавский П. Е., д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Василенко М. Н., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Глухов А. П., д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Гуда А. Н., д. т. н., проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, РФ
Ермаков С. Г., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Заборовский В. С., д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ
Канаев А. К., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Котенко А. Г., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Куренков П. В., д. э. н., к. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Лецкий Э. К., д. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Наседкин О. А., к. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Никитин А. Б., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Новиков Е. А., д. т. н., доц., ВКА, С.-Петербург, РФ
Охтилев М. Ю., д. т. н., проф., НИО ЦИТ «Петрокомета», С.-Петербург, РФ
Привалов А. А., д. воен. н., проф., Академия войск национальной гвардии, С.-Петербург, РФ
Соколов Б. В., д. т. н., проф., СПб ФИЦ РАН, С.-Петербург, РФ
Таранцев А. А., д. т. н., проф., ИПТ РАН, С.-Петербург, РФ
Утепбергенов И. Т., д. т. н., проф., АУЭС, Алматы, Казахстан
Фазылов Ш. Х., д. т. н., проф., НИИ развития цифровых технологий и ИИ, Ташкент, Узбекистан
Хабаров В. И., д. т. н., проф., СГУПС, Новосибирск, РФ
Ходаковский В. А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чехонин К. А., д. ф.-м. н., доц., ХВИЦ ДВО РАН, Хабаровск, РФ

Intellectual Technologies on Transport (Network electronic scientific journal)

Issue 4 (44), 2025

ISSN 2413-2527

Network electronic scientific journal, open access.
It publishes articles in Russian and English with the results of research and practical achievements in the field of intelligent technologies and associated research.
Founded in 2015.

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University"

Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under contract N ЭА78751, 28.12.2024

Frequency of release — 4 issues per year.

Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Phone: +7 812 457 86 06

The online journal "Intellectual Technologies on Transport" is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies, and Mass Media.

El No. FS77-61707 Testimony from May 7, 2015.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

Issues of the magazine are available at <http://itt-pgups.ru>

Khomonenko A. D., Dr. Sci. in Engineering, Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia — Editor-in-Chief

Bozhko L. M., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia — Deputy Editor-in-Chief

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS

Co-chairs of the Editorial Council:

Valinsky O. S., PhD in Engineering, rector of PSTU, St. Petersburg, Russia

Charkin E. I., CIO of JSC "Russian Railways", Moscow, Russia

Adadurov S. E., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia

Dudin A. N., Prof., BSU, Minsk, Belarus

Kornienko A. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Makarenko S. I., As. Prof., Inteltech, St. Petersburg, Russia

Merkuryev Yu. A., Prof., Academician of the Latvian Academy of Sciences, RTU, Riga, Latvia

Titova T. S., Prof., First Vice-Rector PSTU, St. Petersburg, Russia

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Aleksandrova E. B., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia

Basyrov A. G., Prof., MSA, St. Petersburg, Russia

Batalov D. I., PhD in Engineering, PSTU, St. Petersburg, Russia

Bezrodny B. F., Prof., NIIAS, Moscow, Russia

Blagoveshchenskaya E. A., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Bubnov V. P., Prof., St. Petersburg, Russia

Bulavsky P. E., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Vasilenko M. N., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Glukhov A. P., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Guda A. N., Prof., RSTU, Rostov-on-Don, Russia

Ermakov S. G., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Zaborovsky V. S., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia

Kanaev A. K., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Kotenko A. G., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia

Kurenkov P. V., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia

Letsky E. K., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia

Nasedkin O. A., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Nikitin A. B., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Novikov E. A., As. Prof., MSA, St. Petersburg, Russia

Okhtilev M. Yu., Prof., JSC "Petrokomet", St. Petersburg, Russia

Privalov A. A., Prof., Academy of the National Guard Troops, St. Petersburg, Russia

Sokolov B. V., Prof., SPC RAS, St. Petersburg, Russia

Tarantsev A. A., Prof., IPT RAS, St. Petersburg, Russia

Utebergenov I. T., Prof., AUPET, Almaty, Kazakhstan

Fazilov Sh. X., Prof., AIRI, Tashkent, Uzbekistan

Khabarov V. I., Prof., STU, Novosibirsk, Russia

Khodakovskiy V. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Chekhonin K. A., Prof., Khabarovsk FRC RAS,

Khabarovsk, Russia

Содержание

Информационная безопасность и защита данных

Корниенко С. В., Протасов М. С.

Особенности использования ролевой модели безопасности (модель взаимоисключающих ролей) в вузе. 5

Искусственный интеллект и транспортные системы

Герасимов М., Забродин А. В.

Выявление аномалий в масштабных данных с применением Isolation Forest и Autoencoder 17

Злобин С. Е.

Развитие систем визуальной навигации для беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия GPS-сигнала. 26

Зуев Д. В.

Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли. 33

Мельников П. А., Тюгашев А. А.

Формальная верификация программного обеспечения с помощью больших языковых моделей 47

Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей

Бригаднов И. А., Казимиров С. П.

Исследование чувствительности метода анализа иерархий Т. Саати 54

Забродин А. В., Тараканова С. Д.

Концепция построения информационной системы мониторинга и анализа посещаемости студентов на базе веб-технологий 63

Петрушичева А. Ю., Ермаков С. Г.

Будущее цифровых медиа: влияние метавселенной и Web 3.0 на качество информации 72

Математическое моделирование и системный анализ

Сергеева Д. В., Баталов Д. И.

Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация структуры образовательных программ транспортного вуза в условиях перехода к национальной модели высшего образования 79

Лохвицкий В. А., Яковлев Е. Л., Бушев И. В.

Практическое сравнение методов компьютерного зрения и глубокого обучения в задаче бинарной классификации изображений 89

Contents

Information Security and Data Protection

Kornienko S. V., Protasov M. S.

Implementation of the Role-Based Access Control Model (Mutually Exclusive Roles Model)
at Higher Education Institution. 15

Artificial Intelligence and Transport Systems

Gerasimov M., Zabrodin A. V.

Anomaly Detection in Large-Scale Data Using Isolation Forest and Autoencoder 24

Zlobin S. E.

Development of Visual Navigation Systems for Unmanned Aerial Vehicles
in Environments Lacking GPS Signals. 31

Zuev D. V.

Development of Intelligent Transport Systems: Digital Twins in the Railway Industry 45

Melnikov P. A., Tyugashev A. A.

Formal Verification of Software Using Large Language Models. 52

Mathematical and Software Support for Computer Complexes and Networks

Brigadnov I. A., Kazimirov S. P.

A Sensitivity Study of T. Saaty's Analytic Hierarchy Process 61

Zabrodin A. V., Tarakanova S. D.

The Concept of Building an Information System for Monitoring and Analyzing Student Attendance
Based on Web Technologies 70

Petrushicheva A. Yu., Ermakov S. G.

The Future of Digital Media: The Impact of the Metaverse and Web 3.0 on Information Quality 77

Mathematical Modelling and System Analysis

Sergeeva D. V., Batalov D. I.

Mathematical Modelling and Multi-Criteria Optimization of the Educational Programme Structure
in the Transport University in the Context of Transitioning to the National Higher Education Model 86

Lokhvitsky V. A., Yakovlev E. L., Bushev I. V.

Practical Comparison of Computer Vision and Deep Learning Methods for the Binary Image
Classification Task 96

УДК 004.056

Особенности использования ролевой модели безопасности (модель взаимоисключающих ролей) в вузе

- Корниенко Светлана Владимировна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информатика и информационная безопасность». Научные интересы: информационная безопасность, защита информации. E-mail: sv.diass99@yandex.ru
- Протасов Максим Сергеевич** — студент 3-го курса направления 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем». Научные интересы: информационная безопасность, разработка защищенной серверной части приложений, реализация защищенных серверных интерфейсов. E-mail: protasima@bk.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Корниенко С. В., Протасов М. С. Особенности использования ролевой модели безопасности (модель взаимоисключающих ролей) в вузе // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 5–16. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-5-16

Аннотация. *Практическое применение базовой модели ролевого разграничения доступа в современных информационных системах, в том числе информационных системах высших учебных заведений, с каждым годом становится критической проблемой безопасности этих систем. Для повышения уровня безопасности информационной системы при использовании модели ролевого разграничения доступа необходимо вводить дополнительные ограничения на использование ролей, что позволяет при построении системы ограничить количество ролей путем внедрения ограничений привилегий пользователя в сеансе работы. **Цель:** модификация модели ролевого разграничения доступа с введением ограничений по взаимоисключению ролей для повышения уровня безопасности информационной системы высшего учебного заведения. **Методы:** применены методы статического и динамического взаимного исключения ролей, методы статического и динамического количественного ограничения на обладание ролью и правами доступа. **Результаты:** разработана модель ролевого разграничения доступа с добавлением взаимоисключающих ролей, выполнена программная реализация тестовой модели. **Практическая значимость:** заключается в повышении уровня безопасности при применении модели ролевого разграничения доступа в информационных системах, которым свойственна сложная архитектура системы ролей.*

Ключевые слова: ролевое разграничение доступа, модель взаимоисключающих ролей, политика разграничения доступа, информационная безопасность

2.3.6 — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Введение

В условиях стремительного развития информационных технологий и цифровизации всех сфер жизнедеятельности общества особую актуальность приобретает проблема обеспечения безопасного и дифференцированного доступа к данным, циркулирующим в информационных системах.

Одной из самых гибких и понятных моделей разграничения доступа является ролевая модель, которая учитывает не только внутреннюю иерархию пользователей информационной системы, но и иерархию организации, в которой применяется информационная система [1].

При этом базовая модель ролевого разграничения доступа имеет один существенный недостаток. При использовании такой модели в классическом варианте перед администратором безопасности возникает дилемма: при определении небольшого количества ролей с широкими полномочиями существенно снижается безопасность модели, при создании большого количества ролей возникают сложности управления моделью. Для решения этой проблемы возможно строить различные модификации базовой ролевой модели [2]. Одним из простых, но эффективных решений является добавление в базовые механизмы различного рода ограничений на использование ролей.

Ролевая модель разграничения доступа

Базовая модель ролевого разграничения доступа (РРД) определяет самые общие принципы построения моделей РРД. В базовой модели РРД основными элементами являются множества пользователей U , множество ролей R , множество полномочий (прав доступа на объекты компьютерной системы) P , множество сессий пользователей S , а также функции:

- $PA: R \rightarrow 2^P$ — функция, определяющая для каждой роли множество прав доступа; при этом для каждого $p \in P$ существует $r \in R$ такая, что $p \in PA(r)$;
- $UA: U \rightarrow 2^R$ — функция, определяющая для каждого пользователя множество ролей, на которые он может быть авторизован;
- $user: S \rightarrow U$ — функция, определяющая для каждой сессии пользователя, от имени которого она авторизована;
- $roles: S \rightarrow 2^R$ — функция, определяющая для пользователя множество ролей, на которые он авторизован в данной сессии, при этом в каждый момент времени для каждого $s \in S$ выполняется условие: $roles(s) \subseteq UA(user(s))$.

В базовой модели РРД определены следующие принципы [3, 4]:

- одному субъекту (пользователю) может быть присуще множество ролей;
- одна роль может относиться к множеству пользователей;

- одной роли может быть присуще множество прав доступа;
- одно право доступа может относиться к множеству ролей;
- может быть роль, не присущая ни одному пользователю;
- может быть право доступа, не присущее ни одной роли.

Для обеспечения возможности большего соответствия реальным информационным системам, каждый пользователь которых занимает определенное положение в служебной иерархии организации, на множестве ролей в модели также реализуется иерархическая структура. Данный механизм обеспечивается введением отношения частичного порядка « \leq ».

В «классической» модели РРД предполагается, что все множества и функции не изменяются с течением времени. Множество ролей, на которые авторизуется пользователь в течение одной сессии, модифицируется самим пользователем. Также в базовой модели отсутствуют механизмы, позволяющие одной сессии активизировать другую сессию — все сессии активизируются пользователем.

Применение базовой модели в вузе

Вопрос эффективности разграничения прав доступа в информационной системе высшего учебного заведения периодически поднимается в научных работах [5–8]. Применение базовой модели РРД в вузе (без дополнительных модификаций) является возможным, но неэффективным и в какой-то мере менее удобным для конечного пользователя. Это связано с тем, что внутренняя иерархия вуза является сложной. Пример построения схемы иерархии вуза на примере ПГУПС приведен на рис. 1 [9].

На рис. 1 пунктиром обозначены косвенные (непрямые) связи. Фигурами одного цвета обозначены большие структуры и их составляющие (например, ректорат и различные проректоры).

Необходимо отметить, что для каждого факультета также свойственна определенная иерархия. Общая схема такой иерархии приведена на рис. 2.

На рис. 2 контрастными цветами обозначены непрямые связи между различными уровнями ие-

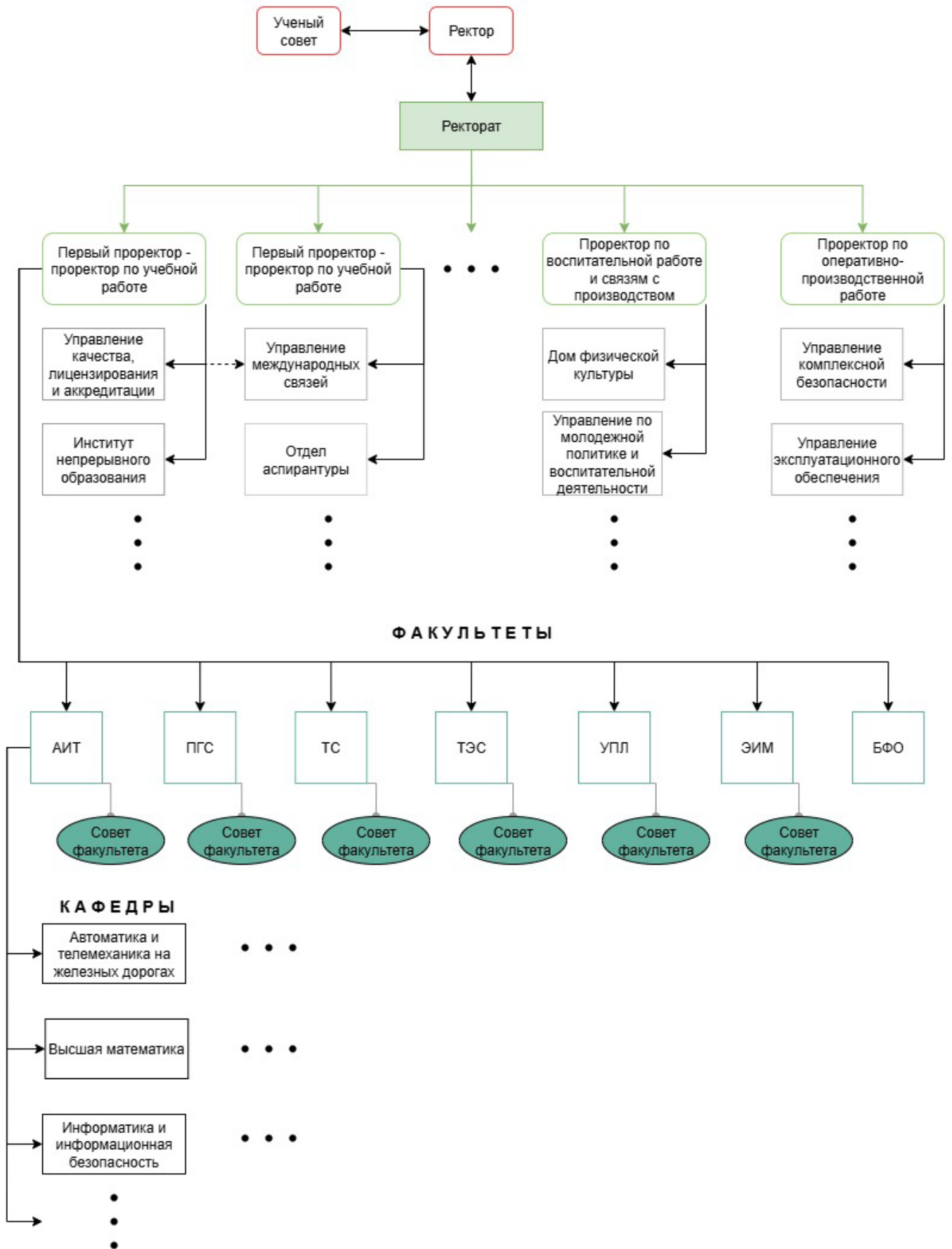


Рис. 1. Общая иерархия вуза на примере ПГУПС

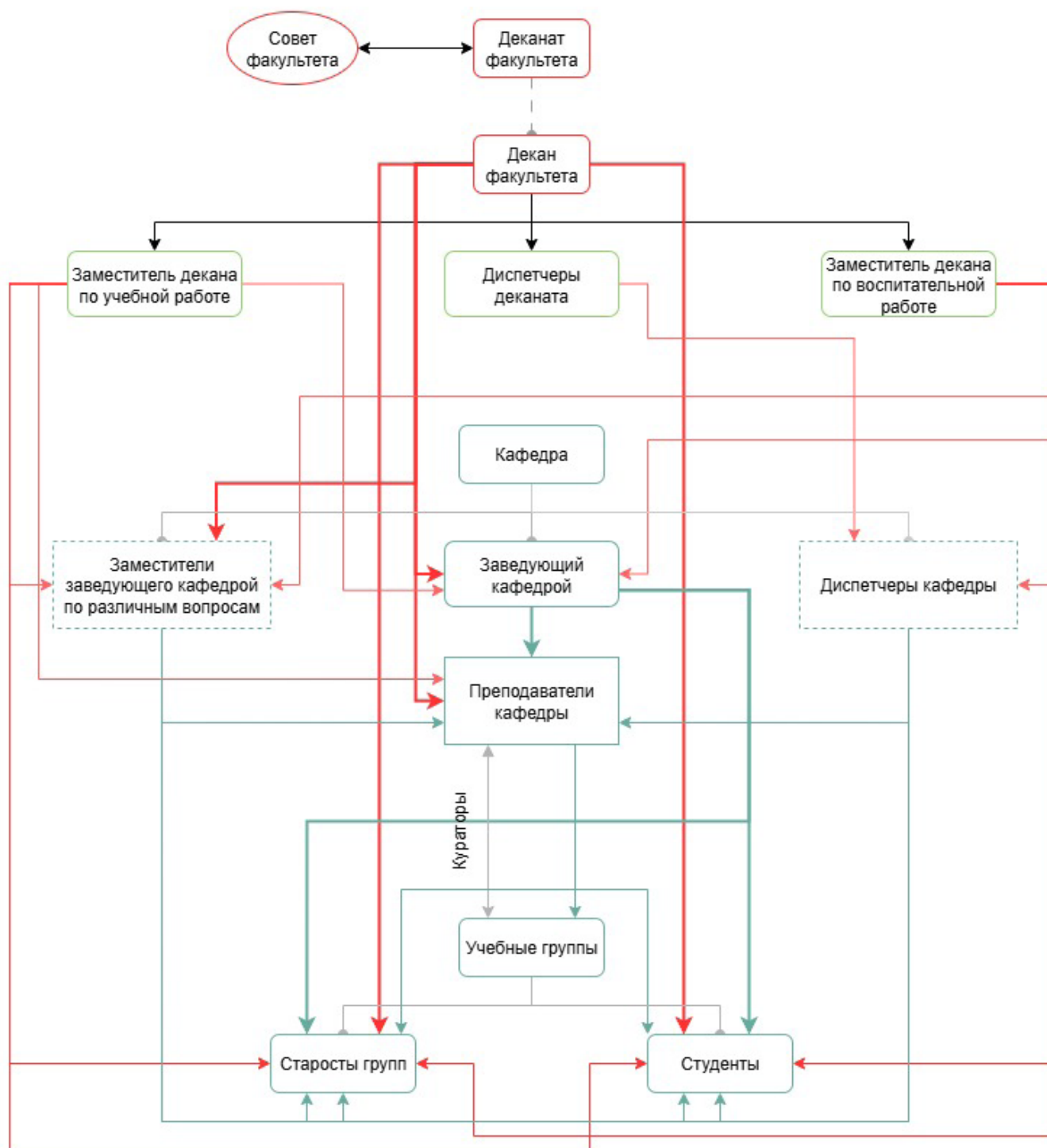


Рис. 2. Общая схема внутренней иерархии факультета

рархии: например, темно-красным выделена связь между деканом факультета и студентами, темно-зеленым — между заведующим кафедрой и старостами групп и т. д.

Из построенных схем видно, что мощность множества ролей большая, кроме того, необходимо учитывать иерархию. Наряду с этим сами

связи являются сложными: так, например, ректор может иметь прямую связь с деканом какого-либо факультета, минуя проректора, а деканы — с преподавателями, минуя заведующих кафедрами. Построение приближенной схемы иерархии, которая учитывает все возможные связи, является объемной и трудоемкой задачей.

Построение множества пользователей U на основе внутренней иерархии вуза, которое будет удовлетворять следующим условиям:

1) каждому пользователю соответствует только одна роль,

2) каждый пользователь в определенный момент времени имеет только те права, которые ему действительно нужны в этот момент времени, не представляется возможным. Возможно лишь определение конечного множества пользователей, при этом каждый пользователь будет авторизован со всеми ролями одновременно, то есть будет иметь все права, присущие ему, в любой момент времени.

Иными словами, данную проблему можно описать так: при построении базовой модели РРД для реальной организации необходимо учитывать не только прямые связи, которые показаны на иерархии организации, но и так называемые косвенные связи, которые реализуются между различными уровнями иерархии, минуя промежуточные уровни.

Данный фактор является серьезной угрозой безопасности защищаемой системы в целом. К тому же контроль такой системы практически невозможен из-за большого количества пользователей.

Решением этой проблемы является создание статических и динамических ограничений прав доступа или ролей, то есть использование модификации классической модели РРД — модели взаимоисключающих ролей.

Модель взаимоисключающих ролей

При проектировании модели взаимоисключающих ролей множество ролей и множество прав доступа разбиваются на непересекающиеся подмножества. При этом каждый пользователь может обладать не более чем одной ролью из каждого подмножества ролей, а каждая роль — не более чем одним правом доступа из каждого подмножества прав доступа.

Модель взаимоисключающих ролей включает в себя следующие принципы [3, 4]:

1. Статическое взаимное исключение ролей или прав доступа обеспечивается путем разделения множества ролей и множества прав доступа на непересекающиеся подмножества, которые удовлетворяют условиям:

$$R = R_1 \cup R_n, R_i \cap R_j = \emptyset \text{ для } 1 \leq i < j \leq n;$$

$$|UA(u) \cap R_i| \leq 1 \text{ для } u \in U, i = 1, 2, \dots, n;$$

$$P = P_1 \cup \dots \cup P_m, P_i \cap P_j = \emptyset \text{ для } 1 \leq i < j < m;$$

$$|PA(r) \cap P_i| \leq 1 \text{ для } p \in U, i = 1, 2, \dots, m.$$

Статическое взаимоисключение ролей (прав доступа) выполняется при проектировании и разработке системы разграничения доступа. Суть данного метода заключается в определении структуры множества ролей, а также основных ролей и присущих им прав доступа.

Как правило, на данном этапе выделяются такие роли, удаление которых недопустимо, а изменение прав доступа, присущих этим ролям, будет производиться при модернизации или обновлении всей системы защиты в целом, то есть при приостановке функционирования системы на короткий промежуток.

2. Динамическое взаимное исключение ролей обеспечивается разделением множества ролей на непересекающиеся подмножества, которые удовлетворяют условиям:

$$R = R_1 \cup \dots \cup R_n, R_i \cap R_j = \emptyset \text{ для } 1 \leq i < j \leq n;$$

$$|\text{roles}(s) \cap R_i| \leq 1 \text{ для } s \in S, i = 1, 2, \dots, n.$$

При этом в каждой сессии пользователь может обладать не более чем одной ролью из каждого подмножества ролей.

Динамическое взаимное исключение ролей обеспечивается специальным механизмом (например, скриптом), который в зависимости от того, какую сессию активизировал пользователь, выдает ему ту или иную роль. В большинстве реализаций данный механизм предусматривает выбор пользователем одной из присущих им ролей и работает в реальном времени.

3. Задание статического количественного ограничения на обладание ролью или правом доступа, то есть определение двух функций:

$$\alpha: R \rightarrow N_0;$$

$$\beta: P \rightarrow N_0,$$

где N_0 — множество натуральных чисел с нулем, при выполнении условий:

$$|UA^{-1}(r)| \leq \alpha(r) \text{ для } r \in R;$$

$$|PA^{-1}(p)| \leq \beta(p) \text{ для } p \in P.$$

Для каждой (или определенной) роли устанавливается максимальное число пользователей, которые могут быть на нее авторизованы, а для каждого права доступа — максимальное число ролей, которые могут им обладать.

Такое ограничение бывает полезно, когда при разработке или проектировании системы необходимо ограничить количество пользователей, у которых может быть определенная роль (например, роль администратора безопасности системы должна быть только у одного пользователя) или ограничить количество прав, которое может быть у ролей (например, когда мощность множества прав доступа велика).

4. Задание динамического количественного ограничения на обладание ролью, то есть определение функции

$$\gamma: R \rightarrow N_0$$

при выполнении условия

$$|\text{roles}^{-1}(r)| \leq \gamma(r) \text{ для } r \in R.$$

Для роли устанавливается максимальное число сессий, которые могут быть одновременно на нее авторизованы.

Динамическое ограничение обеспечивает дополнительную защиту от сбоев системы, способных привести к искажению или потере данных. В качестве примера можно привести ограничение на одновременную активность: разрешена только одна сессия администратора безопасности системы.

На рис. 3 представлена общая модель взаимоисключающих ролей, которая включает в себя как статическое, так и динамическое взаимное исключение ролей.

В приближении статическое взаимоисключение ролей представлено на рис. 4.

Динамическая модель взаимоисключающих ролей в приближении может иметь различную структуру, что зависит от ее конкретной реализации.

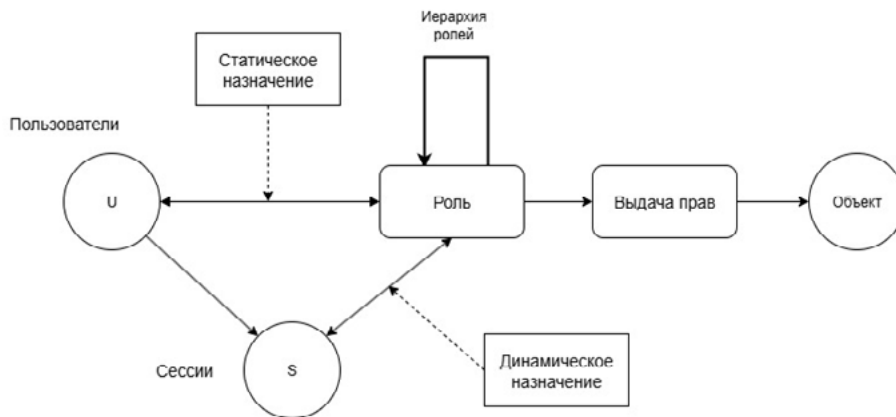


Рис. 3. Модель взаимоисключающих ролей

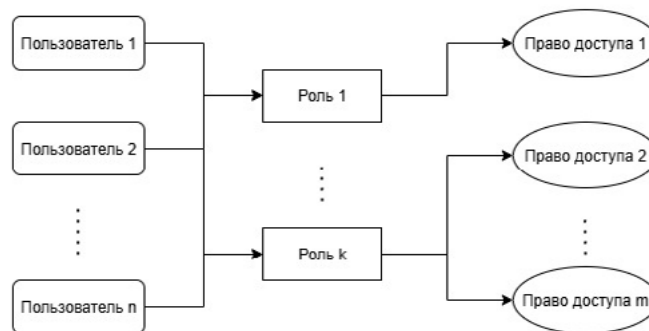


Рис. 4. Общая схема статического взаимного исключения ролей

Особенности применения модели взаимоисключающих ролей в вузе

В связи со сложной структурой иерархии вуза, которая была рассмотрена ранее, следует выделить следующие особенности построения модели взаимоисключающих ролей для разграничения доступа.

Перед описанием особенности построения модели взаимоисключающих ролей следует отметить следующие пункты, свойственные большинству процессов построения моделей разграничения доступа:

1. Необходимо описать объекты, которые находятся в информационной системе, и субъекты, через которые происходит взаимодействие с объектами.

2. Определить пользователей, которые обеспечивают и поддерживают функционирование системы (технические специалисты, администраторы безопасности и др.) и выделить присущие им роли.

3. Для описанных ранее ролей необходимо задать количественные ограничения и реализовать жесткую привязку этих ролей к конкретным пользователям.

После выполнения вышеописанных пунктов следует построить формальное описание основных групп пользователей и присущих им ролей, полномочий, а также дополнительных ограничений, называемых атрибутами, на каждую роль, выделить несовместимые роли [10, 11]. Рекомендуется выполнять проектирование модели взаимоисключающих ролей снизу вверх, то есть начиная с самых нижних уровней иерархии, которые обладают меньшим количеством полномочий.

В качестве атрибутов ролей можно определить для роли студента номер его группы, курс обучения и т. д. Несовместимыми ролями на примере вуза являются роли студента и преподавателя, ведущего кафедрой. Никакая роль из внутренней иерархии организации несовместима с ролями пользователей, отвечающих за функционирование системы.

Проверку на наличие у пользователей несовместимых ролей (например, при компрометации базы данных учетных записей) можно реализовать

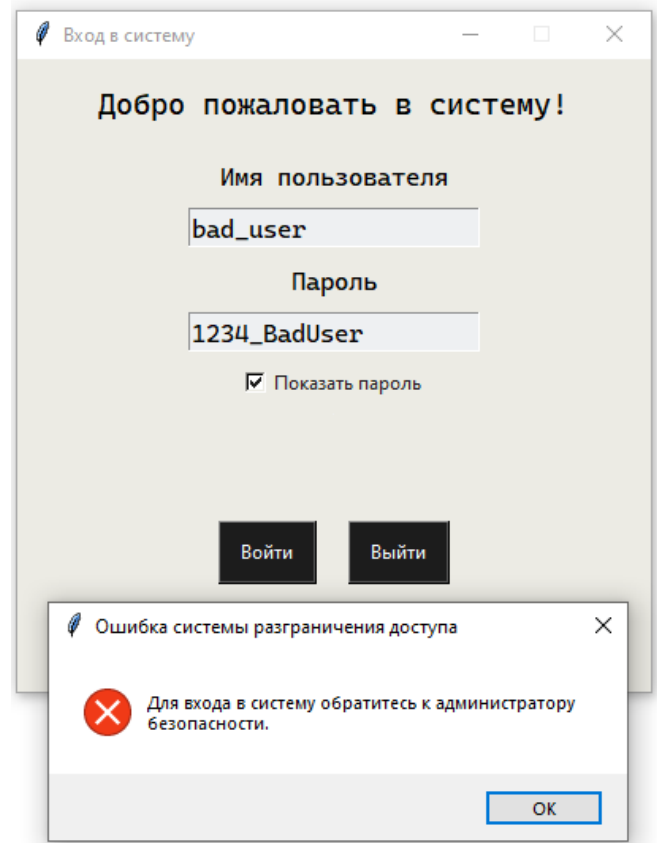


Рис. 5. Отказ в доступе пользователю с несовместимыми ролями

путем отказа в доступе в систему и формирования запроса к администратору безопасности системы (рис. 5).

Стоит отметить, что статическое взаимное исключение ролей подойдет только для двух групп пользователей: «студенты» и «старосты учебных групп». Во-первых, это обусловлено тем, что данные группы пользователей обладают наименьшим количеством полномочий (находятся на нижнем уровне иерархии). Во-вторых, то, что роль «староста учебной группы» обладает полномочиями роли «студент», не является уязвимостью. Напротив, это более удобно и эффективно для конечного пользователя. Однако обратная ситуация недопустима: роль «студент» не может обладать полномочиями роли «староста».

На основе построенного описания основных групп пользователей и присущих им ролей выполняется статическое определение ролей и полномочий. Лучше всего реализовать это в виде таблицы или любой другой структуры данных (табл. 1).

Таблица 1

Статическое определение ролей и полномочий

Группы пользователей	Название ролей	Основные полномочия	Атрибуты
Студент	Студент (student)	Просмотр учебных курсов Просмотр успеваемости ...	Специальность Номер группы Курс
Староста	Староста (head_student)	Полномочия роли «Студент» + Редактирование журналов посещаемости ...	Как у «Студент»
Преподаватель	Преподаватель (coach)	Редактирование учебных курсов Редактирование журналов успеваемости ...	Ученое звание Преподаваемые дисциплины Кафедра ...
Заведующий кафедрой	Заведующий кафедрой (department_head)	Назначение преподавателей на курсы ...	Ученая степень Ученое звание Кафедра ...

Безусловно, для реальной организации такая таблица будет содержать в себе намного больше информации, но использование принципа структурирования данных упростит в дальнейшем реализацию и внедрение системы разграничения доступа в информационную систему организации.

Для передачи полномочий (прав доступа) субъектам системы, через которые пользователь взаимодействует с объектами, формируется множество активируемых пользователем сессий путем выстраивания связей между полномочиями, субъектами и объектами. Права доступа при этом можно разграничить так, чтобы при выборе роли и активации сессии пользователь напрямую не видел те объекты, на взаимодействие с которыми у него недостаточно полномочий.

Например, наполнение рабочего окна для пользователя с ролью «староста группы» (рис. 6, а) и присущими этой роли полномочиями отличается

от наполнения рабочего окна для пользователя с ролью «преподаватель» (рис. 6, б), но при этом они имеют доступ к одинаковым объектам, различаются лишь полномочия, присущие ролям этих пользователей. Рабочее окно для администратора безопасности системы отличается от других, поскольку он работает с другими объектами — базой данных учетных записей, ролями и полномочиями, журналами логирования и ошибок.

На данном этапе также поможет принцип построения снизу вверх: использование такого подхода может облегчить построение элементов множества сессий для ролей, больших по иерархии, поскольку многие наборы (роль, права доступа, активируемая сессия) уже были реализованы, а для пользователя, который обладает ролями разных уровней иерархии, останется определить только набор с ролью большей иерархии. Пример построения множества сессий для двух пользователей приведен на рис. 7.



а



б

Рис. 6. Рабочее окно пользователя:
а — с ролью «староста группы»; б — с ролью «преподаватель»

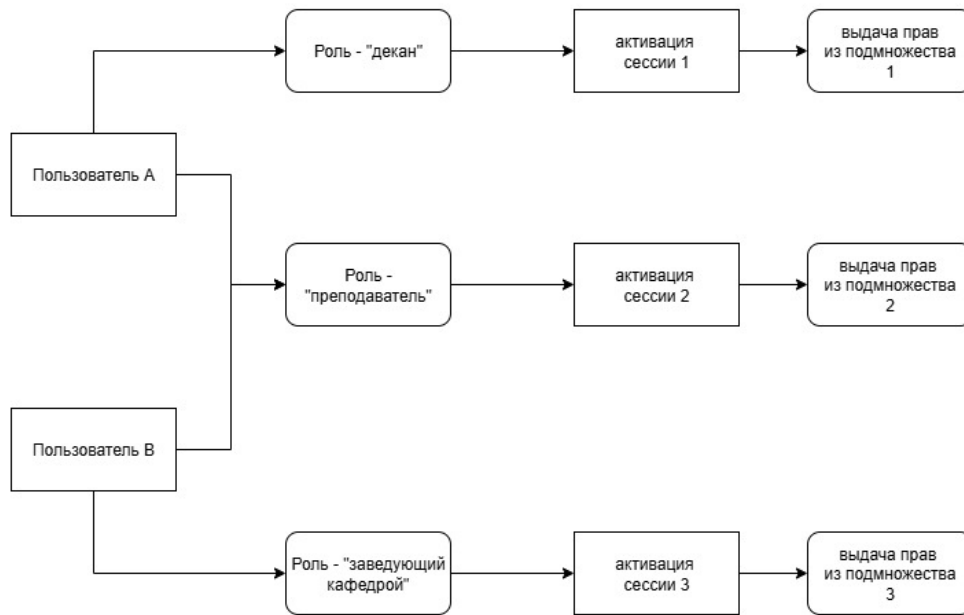


Рис. 7. Пример построения множества сессий

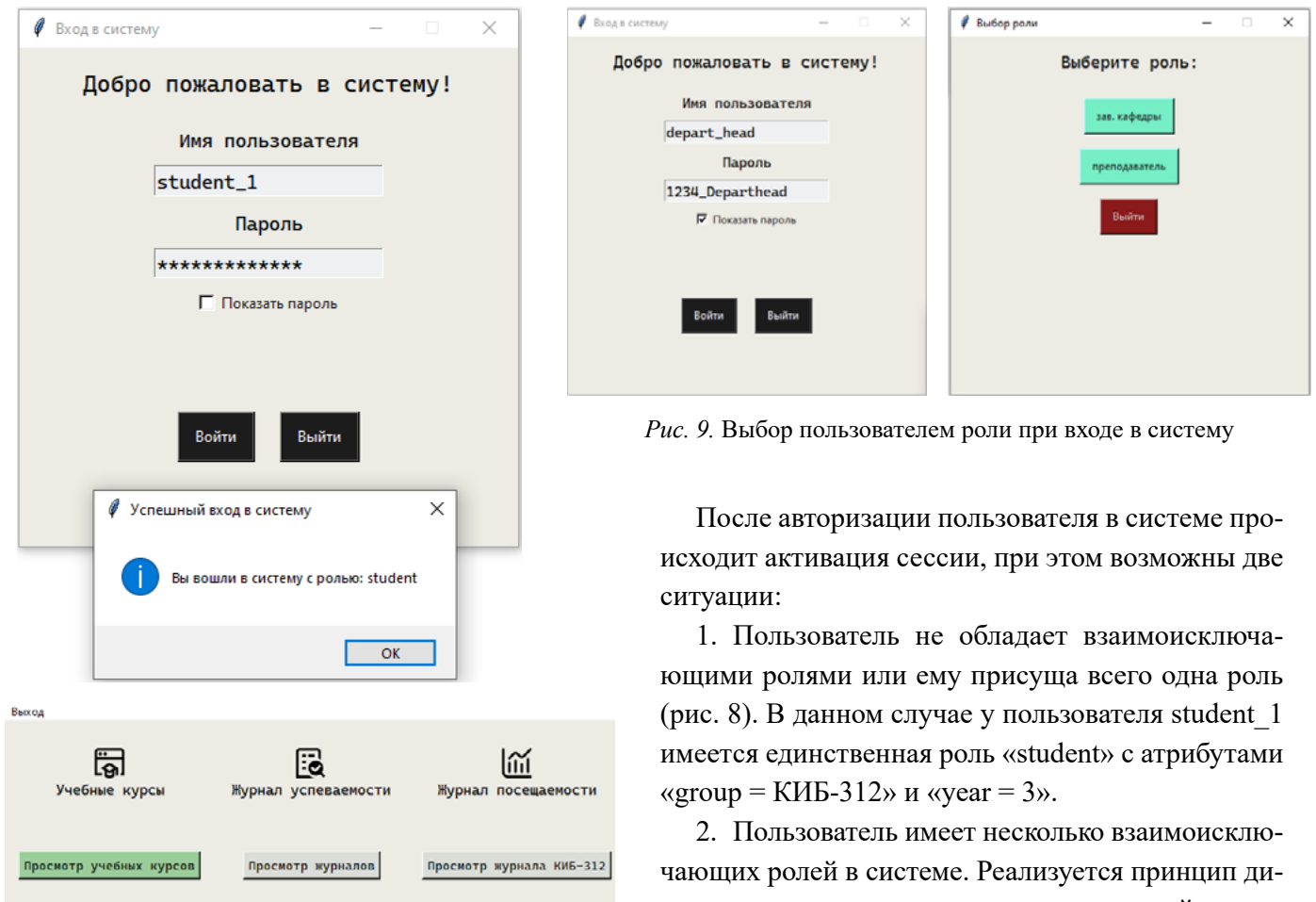


Рис. 8. Активация сессии для пользователя с одной ролью

Рис. 9. Выбор пользователем роли при входе в систему

После авторизации пользователя в системе происходит активация сессии, при этом возможны две ситуации:

1. Пользователь не обладает взаимоисключающими ролями или ему присуща всего одна роль (рис. 8). В данном случае у пользователя student_1 имеется единственная роль «student» с атрибутами «group = КИБ-312» и «year = 3».

2. Пользователь имеет несколько взаимоисключающих ролей в системе. Реализуется принцип динамического взаимного исключения ролей: после авторизации в системе пользователь выбирает, под какой ролью он хочет работать (рис. 9), и активируется сессия с соответствующими полномочиями.

Заключение

В результате проведенного исследования были рассмотрены теоретические основы и практические аспекты применения модели взаимоисключающих ролей в информационной системе высшего учебного заведения.

Внедрение такой модификации базовой модели ролевого разграничения доступа является эффективным инструментом обеспечения информационной безопасности системы на основе следующих принципов:

1. Ограничение количества ролей и прав доступа в конкретный момент времени и на протяжении всего действия активной сессии.
2. Возможность динамического изменения ролей тем пользователям, у которых их несколько.
3. Возможна реализация механизмов, позволяющих добавлять/удалять новых пользователей без приостановки функционирования системы, построенной на основе описываемой модели: достаточно добавить новый элемент, состоящий из набора «пользователь, роль, права доступа» в множество сессий.

4. Возможна реализация механизмов, позволяющих добавлять/удалять роли или права доступа конкретных пользователей: достаточно добавить или удалить соответствующий элемент из множества сессий или убрать набор «пользователь, роль, права доступа» из этого элемента.

Основной задачей при реализации подобной модели является необходимость обработки большого объема данных, который нужно формализовать, разбить на множества и выстроить связи. При использовании принципа нисходящего проектирования данной модели задача существенно упрощается, и трудности могут возникнуть лишь при описании пользователей с уникальными ролями, которые не встречались ранее.

Практическая значимость исследования заключается в разработке принципов реализации модели взаимоисключающих ролей в информационных системах, которым свойственна сложная архитектура системы ролей. Данный подход может быть использован не только в учебных заведениях, но и в организациях других сфер деятельности с большим числом сотрудников, в которых необходим контроль конфликтных полномочий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ролевая модель разграничения прав // Блог компании «Солар». 2023. 31 мая. URL: http://rt-solar.ru/products/solar_inrights/blog/3481 (дата обращения: 08.11.2025).
2. Рахметов Р. Ролевая модель безопасности и ее отличия от атрибутной модели управления доступом // Блог компании Security Vision. 2024. 26 августа. URL: <http://www.securityvision.ru/blog/rolewaya-model-bezopasnosti-i-eye-otlichiya-ot-atributnoy-modeli-upravleniya-dostupom/> (дата обращения: 08.11.2025).
3. Девянин П. Н. Модели безопасности компьютерных систем: учебное пособие для студентов вузов. М.: Академия, 2005. 144 с.
4. Гайдамакин Н. А. Теоретические основы компьютерной безопасности: учебное пособие. Екатеринбург: Уральский гос. ун-т им. А. М. Горького, 2008. 212 с.
5. Змеев А. А. Модели и метод разграничения доступа в образовательных информационных системах на основе виртуальных машин: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 2.3.6 / Змеев Анатолий Анатольевич [Место защиты: Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук]. Тверь, 2022. 23 с.
6. Демурчев Н. Г. Проектирование системы разграничения доступа автоматизированной информационной системы на основе функционально-ролевой модели на примере высшего учебного заведения: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.19 / Демурчев Никита Георгиевич [Место защиты: Таганрогский гос. радиотехнический ун-т]. Таганрог, 2006. 18 с.
7. Раецкий А. Д., Шлянин С. А., Ермакова Л. А. Реализация разграничения прав доступа в информационной системе «Портфолио СибГИУ» // Кибернетика и программирование. 2019. № 2. С. 44–54. DOI: 10.25136/2644-5522.2019.2.18530.
8. Разграничение прав при доступе к сервисам и ресурсам электронной информационно-образовательной среды вуза / А. Ю. Ужаринский, А. И. Фролов, В. Н. Волков [и др.] // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: материалы Девятнадцатой открытой Всероссийской конференции: сборник научных трудов (онлайн, 19–20 мая 2021 г.). М.: ИС-Публишинг, 2021. С. 166–168.

9. Структура и органы управления // Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. URL: <http://www.pgups.ru/struct> (дата обращения: 15.11.2025).

10. Севастьянова Л. Строим ролевую модель управления доступом. Часть первая, подготовительная // Хабр. 2020. 09 июля. URL: <http://habr.com/ru/companies/solarsecurity/articles/509998> (дата обращения: 09.11.2025).

11. Attribute Based Access Control NIST SP 1800-3 Practice Guide Original Draft / В. Fisher, N. Brickman, S. Jha [et al.]. National Cybersecurity Center of Excellence, National Institute of Standards and Technology, 2016. 532 p. URL: <http://www.nccoe.nist.gov/sites/default/files/legacy-files/abac-nist-sp1800-3-draft.pdf> (дата обращения: 08.11.2025).

Дата поступления: 16.11.2025

Решение о публикации: 19.11.2025

Implementation of the Role-Based Access Control Model (Mutually Exclusive Roles Model) at Higher Education Institution

Svetlana V. Kornienko — PhD in Engineering, Associate Professor of the “Information Technology and IT Security” Department. Research interests: information security, information protection. E-mail: sv.diass99@yandex.ru

Maksim S. Protasov — 3rd year Specialist’s Degree Student in 10.05.03 Information Security of Automated Systems. Research interests: information security, secure application server development, implementation of secure server interfaces. E-mail: protasima@bk.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kornienko S. V., Protasov M. S. Implementation of the Role-Based Access Control Model (Mutually Exclusive Roles Model) at Higher Education Institution. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 5–16. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-5-16. (In Russian)

Abstract. *The practical implementation of the role-based access control model (RBAC) in contemporary information systems, particularly those within higher education institutions, has increasingly become a critical security concern. To enhance the security of an information system utilizing the RBAC model, it is essential to impose further restrictions on role usage. This approach will enable the limitation of the number of roles within the system’s architecture by introducing constraints on user privileges during their session. **Purpose:** to modify the role-based access control model by introducing role exclusion constraints to enhance the security of information systems within higher education institutions. **Methods:** both static and dynamic mutual exclusion methods for managing roles, along with static and dynamic quantitative limitations on role possession and access privileges. **Results:** a role-based access control model featuring mutually exclusive roles has been created, and a software implementation of a test model has been successfully carried out. **Practical significance:** this research is expected to enhance security standards in the deployment of role-based access control models within information systems that feature intricate role architecture.*

Keywords: *role-based access control, model of mutually exclusive roles, access control policy, information security*

REFERENCES

1. Rolevaya model razgranicheniya prav [Role-Based Model of Delimitation of Rights], *Solar Company blog*. Available at: http://rt-solar.ru/products/solar_inrights/blog/3481 (accessed: November 08, 2025). (In Russian)

2. Rakhmetov R. Rolevaya model bezopasnosti i ee otlichiya ot atributnoy modeli upravleniya dostupom [Role-Based Security Model and Its Differences from the Attribute-Based Access Control Model], *Security Vision Company*

Blog. Available at: <http://www.securityvision.ru/blog/rolevaya-model-bezopasnosti-i-eye-otlichiya-ot-atributnoy-modeli-upravleniya-dostupom/> (accessed: November 08, 2025). (In Russian)

3. Devyanin P. N. *Modeli bezopasnosti kompyuternykh sistem: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Computer System Security Models: A Tutorial for University Students]. Moscow, Akademiya Publishing House, 2005, 144 p. (In Russian)

4. Gaydamakin N. A. *Teoreticheskie osnovy kompyuternoy bezopasnosti: uchebnoe posobie* [Theoretical Foundations of Computer Security: a tutorial], Yekaterinburg, A. M. Gorky Ural State University, 2008, 212 p. (In Russian)

5. Zmeev A. A. *Modeli i metod razgranicheniya dostupa v obrazovatelnykh informatsionnykh sistemakh na osnove virtualnykh mashin* [Models and Method of Access Control in Educational Information Systems Based on Virtual Machines]: Abstract of the diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). Tver, 2022, 23 p. (In Russian)

6. Demurchev N. G. *Proektirovanie sistemy razgranicheniya dostupa avtomatizirovannoy informatsionnoy sistemy na osnove funktsionalno-rolevoy modeli na primere vysshego uchebnogo zavedeniya* [Design of an Access Control System for an Automated Information System Based on a Functional-Role Model Using a Higher Education Institution as an Example]: Abstract of the diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). Taganrog, 2006, 18 p. (In Russian)

7. Raeckiy A. D., Shlyanin S. A., Ermakova L. A. *Realizatsiya razgranicheniya prav dostupa v informatsionnoy sisteme "Portfolio SibGIU"* [The Implementation of the Differentiation of Access Rights in the "Portfolio SibGIU" Information System], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and Programming], 2019, No. 2, Pp. 44–54. DOI: 10.25136/2644-5522.2019.2.18530. (In Russian)

8. Uzharinskiy A. Yu., Frolov A. I., Volkov V. N., et al. *Razgranichenie prav pri dostupe k servisam i resursam elektronnoy informatsionno-obrazovatelnoy sredy vuza* [Differentiation of Rights When Accessing Services and Resources of the Electronic Information and Educational Environment of the University], *Prepodavanie informatsionnykh tekhnologiy v Rossiyskoy Federatsii: materialy Devyatnadsatoy otkrytoy Vserossiyskoy konferentsii: sbornik nauchnykh trudov* [Teaching Information Technology in Russia: Collection of Research Papers for the 19th Open All-Russian Conference], online, May 19–20, 2021. Moscow, 1C-Publishing, 2021, Pp. 166–168. (In Russian)

9. Structure and Administration, *Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*. Available at: <http://www.pgups.ru/en/struct> (accessed: November 15, 2025).

10. Sevastyanova L. *Stroim rolevuyu model upravleniya dostupom. Chast pervaya, podgotovitel'naya* [Building a Role-Based Access Control Model. Part One, Preparatory], *Khabr Habr*. Published online at July 09, 2020. Available at: <http://habr.com/ru/companies/solarsecurity/articles/509998> (accessed: November 09, 2025). (In Russian)

11. Fisher B., Brickman N., Jha S., et al. *Attribute Based Access Control NIST SP 1800-3 Practice Guide Original Draft*. National Cybersecurity Center of Excellence, National Institute of Standards and Technology, 2016, 532 p. Available at: <http://www.nccoe.nist.gov/sites/default/files/legacy-files/abac-nist-sp1800-3-draft.pdf> (accessed: November 08, 2025)

Received: 16.11.2025

Accepted: 19.11.2025

УДК 004.89

Выявление аномалий в масштабных данных с применением Isolation Forest и Autoencoder

Герасимов Максим — студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: интеллектуальные информационные системы, машинное обучение. E-mail: maxger60@gmail.com

Забродин Андрей Владимирович — канд. ист. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, аналитика данных, проектирование баз данных, веб-разработка, облачные технологии. E-mail: zabrodin@pgups.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Герасимов М., Забродин А. В. Выявление аномалий в масштабных данных с применением Isolation Forest и Autoencoder // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 17–25 . DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-17-25

Аннотация. *Цель:* сравнительный анализ двух методов обнаружения аномалий в больших массивах данных — ансамблевого алгоритма Isolation Forest и нейросетевого Autoencoder. *Методы:* проведено моделирование и экспериментальное сравнение алгоритмов на реальном датасете транзакций по кредитным картам. Используются стандартные метрики эффективности (precision, recall, F1-score, ROC-AUC), а также матрица ошибок для анализа структуры ложных срабатываний и пропусков аномалий. *Результаты:* обе модели достигли высоких значений ROC-AUC, что подтверждает их способность надежно различать нормальные и аномальные транзакции. *Практическая значимость:* разработанные подходы применимы для автоматизированного мониторинга транзакционных потоков, предотвращения мошенничества и анализа больших данных. Наиболее эффективно комбинированное использование Isolation Forest и Autoencoder в гибридных системах, что позволяет повысить точность и снизить количество ложных тревог при обнаружении аномалий.

Ключевые слова: большие данные, аномалии, машинное обучение, нейронные сети, Autoencoder, Isolation Forest, транзакционные данные

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Введение

В условиях роста объемов и сложности данных задача своевременного обнаружения аномалий становится особенно важной. Аномалии — это наблюдения, отклоняющиеся от нормального поведения системы, возникающие из-за сбоев, ошибок или мошеннических действий. Их игнорирование может исказить анализ и привести к неверным решениям.

Обнаружение аномалий актуально в самых разных сферах — от финансов и кибербезопасности до медицины и промышленности. Особый интерес

представляют методы без учителя, не требующие разметки и способные выявлять новые типы отклонений.

Цель исследования — сравнить два современных алгоритма: Isolation Forest и Autoencoder. Рассматриваются их принципы, применение к задаче выявления мошеннических транзакций и оценка эффективности по метрикам precision, recall, F1-score и ROC-AUC, а также с использованием матрицы ошибок.

Теоретические основы

Алгоритмы машинного обучения без учителя для обнаружения аномалий

Для обнаружения аномалий при обучении без учителя применяются методы, не требующие разметки данных. Их делят на несколько групп [1]:

- кластеризационные методы предполагают, что нормальные объекты образуют плотные группы, а аномалии — разрозненные точки. Пример — k-means, где выбросы не вписываются в структуру кластеров;
- ансамблевые методы, такие как Isolation Forest, изолируют редкие объекты с помощью случайных деревьев;
- нейросетевые методы, например Autoencoder и вариационные автокодировщики, восстанавливают исходные данные и считают аномалиями объекты с высокой ошибкой реконструкции.

Выбор алгоритма зависит от структуры данных и требований: одни методы проще и понятнее, другие — гибче и лучше выявляют сложные зависимости [2].

Алгоритм Isolation Forest

Isolation Forest (iForest) — алгоритм обнаружения аномалий, предложенный Фэй Тони Лю (Fei Tony Liu) и др. в 2008 году. Его идея в том, что аномалии проще изолировать, так как они редки и отличаются от большинства данных. Алгоритм строит ансамбль случайных бинарных деревьев (Isolation Trees), где данные рекурсивно делятся по случайным признакам и порогам. Чем короче путь до изоляции объекта, тем выше вероятность, что он аномален. Средняя длина пути по всем деревьям определяет аномальный рейтинг [3].

Алгоритм реализован на Python [4–8]. Визуализация результатов (график, матрица ошибок) реализована на Matplotlib и Seaborn [9–11].

Преимущества:

- линейная вычислительная сложность $O(n)$ и низкие требования к памяти — подходит для больших данных и потоковой обработки;
- не требует предположений о распределении данных, хорошо работает с высокоразмерными и сложными выборками;

- устойчив к шуму, прост в интерпретации (через длину пути) и имеет минимум настраиваемых параметров.

Ограничения:

- возможное переобучение при малом объеме или несбалансированности данных;
- менее эффективен для глобальных аномалий и многомерных зависимостей, так как разбиения выполняются по отдельным признакам;
- не учитывает временные зависимости;
- при высоком уровне шума возможны ложные срабатывания, поэтому важна предварительная очистка данных и настройка порога аномальности.

Несмотря на ограничения, Isolation Forest остается быстрым, масштабируемым и широко применяемым методом для задач вроде выявления мошенничества и мониторинга оборудования.

Алгоритм Autoencoder

Autoencoder — нейросеть без учителя, обучающаяся восстанавливать исходные данные. Она состоит из кодировщика, сжимающего вход до компактного представления, и декодировщика, восстанавливающего исходный сигнал. Модель обучается минимизировать ошибку реконструкции — разницу между входом и выходом [12].

В задачах обнаружения аномалий Autoencoder обучается на нормальных данных. Если подать на вход нетипичный объект, ошибка реконструкции возрастает. Значения ошибки выше заданного порога считаются индикатором аномалии [13].

Как и Isolation Forest, алгоритм реализован на Python. Визуализация результатов (график, матрица ошибок) реализована на Matplotlib и Seaborn.

Преимущества:

- не требует размеченных данных;
- адаптируется к разным типам (изображения, временные ряды, табличные данные);
- выполняет нелинейное понижение размерности, выявляя скрытые зависимости, недоступные линейным методам;
- полученные коды можно использовать для визуализации или других алгоритмов.

Ограничения:

- требует большого объема данных и вычислительных ресурсов;
- при избыточной мощности может восстанавливать и аномалии («перестаравшийся декодер»);
- чувствителен к выбору порога ошибки;
- труден для интерпретации.

Несмотря на ограничения, Autoencoder — мощный инструмент для поиска сложных нелинейных аномалий в данных.

Методика исследования

Описание датасета

Credit Card Fraud Detection

В исследовании используется открытый набор Credit Card Fraud Detection [14, 15]: 284 807 транзакций европейских держателей за два дня сентября 2013 года: 492 (~ 0,17 %) — мошеннические (Class = 1), остальные — нормальные (Class = 0). Каждая транзакция описана 30 признаками: 28 анонимизированных компонент PCA (V1–V28) и два «сырых» — Time (секунды от начала периода) и Amount (сумма в евро) [16]. Набор резко несбалансирован, что усложняет обучение и оценку, поэтому все процедуры и метрики учитывают редкость целевого класса [17].

Подготовка данных: очистка, масштабирование, разметка

Перед обучением проведена предобработка данных. Пропуски не выявлены, а 1081 дубликат был удален.

Для признака Amount выполнена стандартизация (вычитание среднего и деление на стандартное отклонение), чтобы устранить различие масштабов и улучшить сходимость моделей [16].

Целевой признак Class не использовался при обучении, так как методы работают без учителя, но применялся для оценки качества на тестовой выборке.

Данные были разделены на обучающую и тестовую части с сохранением доли классов: обучение проводилось без меток, а проверка — по фактическим значениям Class, что соответствует реальному сценарию применения моделей.

Метрики оценки качества моделей

Для оценки эффективности моделей использовались стандартные метрики бинарной классификации. Основой анализа служит матрица ошибок (confusion matrix), показывающая количество:

- верно обнаруженных аномалий (TP);
- ложных тревог (FP);
- корректно распознанных нормальных транзакций (TN);
- пропущенных аномалий (FN).

На основе этих показателей рассчитываются метрики качества модели [18]:

1. Precision (точность) — доля корректно выявленных мошеннических транзакций среди всех, отмеченных моделью как аномальные:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} .$$

2. Recall (полнота) — доля выявленных моделью мошеннических транзакций среди всех реально имеющих место мошеннических операций:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} .$$

Эта метрика отражает чувствительность алгоритма к аномалиям, показывая, какую часть от общего числа мошенничеств удалось обнаружить. Формально полнота равна доле верно найденных аномалий от общего числа аномалий. В контексте рассматриваемой задачи Recall отвечает на вопрос: насколько хорошо модель покрывает все случаи мошенничества, не пропуская их.

3. F1-мера (F1-score) — гармоническое среднее между точностью и полнотой. Эта интегральная метрика позволяет сбалансированно оценить алгоритм по совокупности точности и полноты:

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} .$$

F1-score особенно важна при сильной несбалансированности классов, как в исследуемом случае: она показывает баланс между точностью и полнотой, когда высокая точность может сопровождаться пропуском аномалий [18].

4. ROC-AUC, близкое к 1, свидетельствует о высокой способности модели различать нормальные и аномальные объекты. При сильной несбалансированности также анализируется кривая Precision-Recall и AUC-PR, однако основным показателем остается ROC-AUC.

В задачах обнаружения аномалий важно учитывать стоимость ошибок: в банковской сфере пропущенное мошенничество критичнее, чем ложная тревога. Поэтому, помимо интегральных метрик, анализируется и структура ошибок по матрице ошибок.

Этапы построения моделей

Практическая часть исследования включала реализацию и сравнение двух моделей обнаружения аномалий — Isolation Forest и Autoencoder. Работа проводилась в несколько этапов:

1–2. Загрузка и разделение данных

Исходный датасет транзакций был случайным образом разделен на обучающую и тестовую выборки в пропорции 70/30 с сохранением исходной доли мошеннических операций (~ 0,17 %), чтобы обеспечить репрезентативность данных и исключить смещение результатов. Признак Time не использовался при разделении, так как транзакции упорядочены по времени [16].

На этапе предобработки были удалены дубликаты, проверено отсутствие пропусков и выполнена стандартизация признаков. Целевая метка Class не применялась при обучении, так как модели обучались без учителя, но сохранялась для последующей оценки качества по показателям TP, FP, FN и TN.

3. Обучение модели Isolation Forest

Алгоритм Isolation Forest реализован с помощью библиотеки `sklearn.ensemble`. Модель обучалась на данных без меток мошенничества. Основные параметры — `n_estimators` (число деревьев — 100–200) и `max_samples` (размер подвыборки, равный обучающей выборке) [19].

После обучения каждая транзакция получила оценку аномальности, основанную на средней длине пути изоляции: чем короче путь, тем выше

вероятность аномалии. Порог определялся параметром `contamination = 0,0017` (0,17 % данных), что соответствует доле выбросов [8].

Модель пометила около 0,17 % транзакций как аномальные. Эти результаты сравнивались с реальными метками для построения confusion matrix и расчета метрик Precision, Recall, F1 и ROC-AUC.

4. Обучение модели Autoencoder

Разработка и обучение модели проведены с использованием фреймворка глубокого обучения TensorFlow/Keras [8]. Архитектура — полносвязная (MLP): входной слой на 30 признаков → несколько скрытых слоев с убывающим числом нейронов → узкое «горлышко» ($d \approx 8$) → симметричный декодер до 30-мерного выхода. Обучение велось на стандартизированных данных; функция потерь — MSE, оптимизатор — Adam [8, 13]. Метка Class в обучении не использовалась; явные аномалии не исключались из-за их крайне малой доли (< 0,2 %). После обучения для каждого объекта вычислялась ошибка реконструкции; порог для решения «аномалия/норма» подбирался по валидации (ориентир — верхние ~ 0,17 % ошибок либо максимум F1). Превышение порога трактовалось как аномалия. На тестовой выборке по предсказаниям была построена матрица ошибок и рассчитаны Precision, Recall, F1 и ROC-AUC.

5. Сравнение и интерпретация результатов

На заключительном этапе обе модели были протестированы на отложенной выборке. Их эффективность оценивалась по метрикам Precision, Recall, F1 и ROC-AUC. Дополнительно анализировалась матрица ошибок для разграничения ложных тревог и пропущенных случаев. Также сопоставлялось пересечение выявленных транзакций, что позволило оценить комплементарность подходов и вклад каждой модели в общую детекцию.

На базе проведенного эксперимента формулируются выводы о применимости каждого метода к задаче обнаружения аномалий в транзакционных данных и рекомендации по их использованию (возможно, совместно) для повышения эффективности системы обнаружения мошенничества.

Результаты экспериментов

Результаты Isolation Forest

Алгоритм Isolation Forest был применен для выявления выбросов без использования разметки (обучение на всех данных как на нормальных). Распределение оценок аномальности (рис. 1) показывает, что основная часть наблюдений характеризуется низкими значениями, тогда как небольшой фрагмент выборки имеет заметно более высокие оценки и выделяется как потенциальные аномалии. Пороговое значение для разделения «норма/

аномалия» определялось по статистике распределения (например, 99-й перцентиль) либо по результатам валидации.

Результаты показали, что Isolation Forest изолирует аномальные транзакции быстрее и эффективнее. Алгоритм выявил до 85–90 % мошеннических операций, при точности ~ 0,81–0,85, F1 ~ 0,84–0,85 и ROC-AUC = 0,95, что подтверждает высокое качество разделения нормальных и аномальных данных. Итоговое распределение ошибок классификации представлено на рис. 2, где показана матрица ошибок алгоритма Isolation Forest.

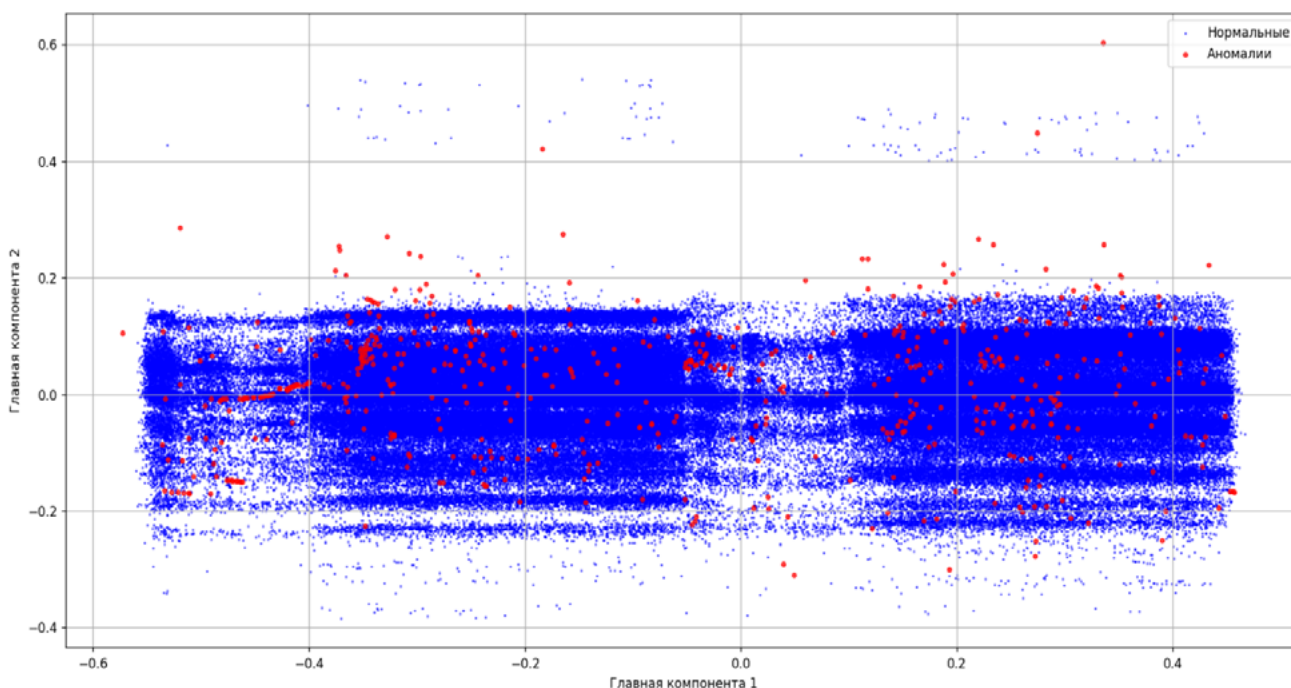


Рис. 1. Результаты алгоритма Isolation Forest (PCA-визуализация)

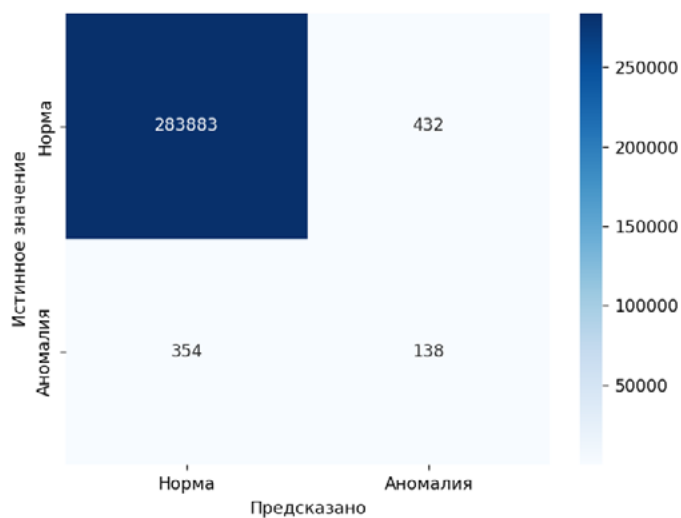


Рис. 2. Матрица ошибок алгоритма Isolation Forest

Результаты Autoencoder

Autoencoder обучался на данных, отражающих нормальное поведение системы, формируя компактное представление закономерностей [13]. Для обычных транзакций ошибка реконструкции была низкой, а для аномальных — заметно выше. Порог классификации определялся по статистике ошибок (например, 95-й перцентиль), что позволяло отделить редкие нетипичные наблюдения от основной массы нормальных.

Итоговые результаты и матрица ошибок алгоритма Autoencoder показаны на рис. 3 и 4.

Autoencoder выявлял аномалии по превышению порога ошибки реконструкции. Модель показала более высокую точность ($\sim 0,88\text{--}0,90$) и меньше ложных тревог по сравнению с Isolation Forest. Полнота составила $\sim 0,81\text{--}0,85$, F1 — $\sim 0,84\text{--}0,87$, ROC-AUC — $\sim 0,94\text{--}0,96$, что подтверждает высокую эффективность модели.

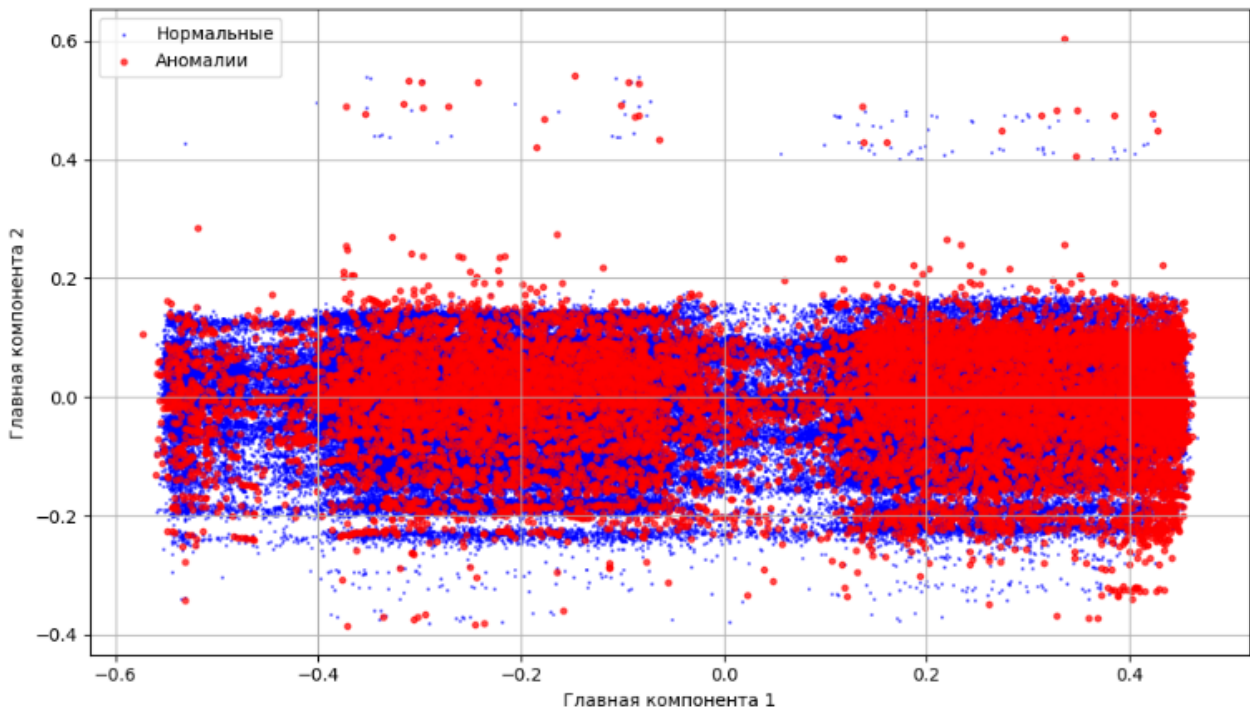


Рис. 3. Результаты алгоритма Autoencoder (PCA-визуализация)

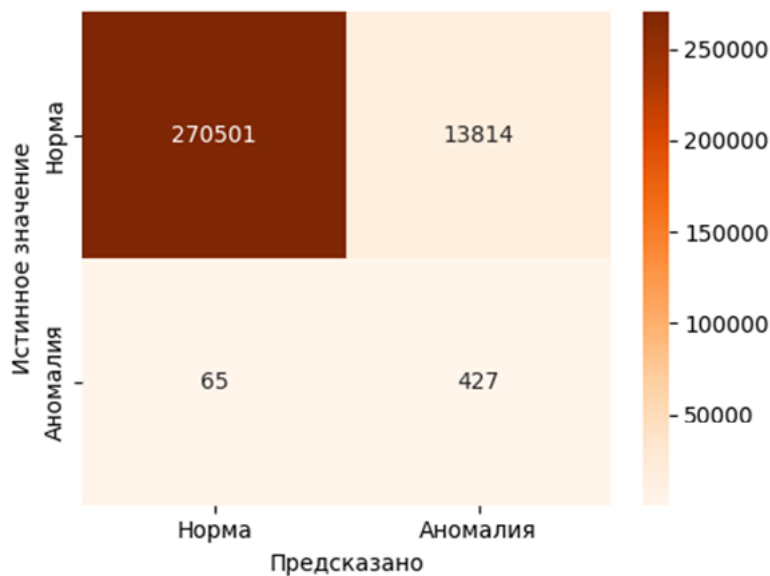


Рис. 4. Матрица ошибок алгоритма Autoencoder

Сравнительный анализ моделей

Для наглядности сравнения качества работы моделей табл. 1 суммирует полученные метрики для Isolation Forest и Autoencoder.

Таблица 1

Сравнительная таблица алгоритмов

Критерий	Isolation Forest	Autoencoder
Точность	Высокая	Очень высокая
Работа с временными рядами	Неприменим напрямую	Подходит (через окна)
Интерпретируемость	Хорошая	Ограниченная
Скорость обучения	Высокая	Средняя/низкая
Универсальность	Средняя	Высокая

Основные показатели на контрольном наборе данных можно обобщить следующим образом:

1. Точность (Precision): Autoencoder ($\sim 0,88$) превосходит Isolation Forest ($\sim 0,81$) по точности обнаружения аномалий, что указывает на меньшую долю ложных срабатываний.

2. Полнота (Recall): Isolation Forest ($\sim 0,87$) превышает Autoencoder ($\sim 0,81$) по полноте выявления, то есть охватывает большее число истинных аномалий.

3. F1-мера: Autoencoder показал слегка более высокое значение F1 ($\sim 0,84$ – $0,87$) по сравнению с Isolation Forest ($\sim 0,84$ – $0,85$), отражая лучшую гармоническую комбинацию Precision и Recall.

4. ROC-AUC: Метрика ROC-AUC оказалась высокой для обеих моделей ($> 0,9$), что свидетельствует о сопоставимой эффективности в ранжировании нормальных и аномальных объектов.

Стоит отметить вычислительные аспекты. Isolation Forest проще и быстрее обучается и хорошо масштабируется, что делает его удобным для анализа больших данных при ограниченных ресурсах. Autoencoder требует больше вычислительных мощностей и настройки архитектуры, но лучше выявляет сложные и тонкие аномалии в данных.

Заключение

В исследовании сравнивались два метода обнаружения аномалий в транзакциях — Isolation Forest и Autoencoder. Обе модели показали высокую эффективность, надежно различая нормальные и аномальные операции.

Isolation Forest выявляет большинство аномалий, но дает больше ложных срабатываний (высокая полнота выявления при умеренной точности). Autoencoder снижает число ложных тревог, но пропускает часть редких событий (высокая точность при сопоставимой F1-мере). Выбор метода зависит от приоритетов: при важности полноты — Isolation Forest, при акценте на точность — Autoencoder.

Оба алгоритма подходят для анализа больших данных и обнаружения нетипичных событий. Перспективным является их комбинированное использование: Isolation Forest — для первичного выявления, Autoencoder — для уточняющей фильтрации. Такой подход повышает общую эффективность систем обнаружения аномалий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Обзор методов обнаружения аномалий в потоках данных / В. П. Шкодырев, К. И. Ягафаров, В. А. Баштовенко, Е. Э. Ильина // Proceedings of the Second Conference on Software Engineering and Information Management (SEIM-2017), (Saint Petersburg, Russia, 21 April 2017). CEUR Workshop Proceedings. 2017. Vol. 1864. Pp. 50–56.
2. Анализ данных и процессов: учебное пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод [и др.]. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
3. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z.-H. Isolation Forest // Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Data Mining (Pisa, Italy, 15–19 December 2008). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. Pp. 413–422. DOI: 10.1109/ICDM.2008.17.
4. Scikit-learn: Machine Learning in Python. URL: <http://scikit-learn.org> (дата обращения: 18.10.2025).
5. Pandas: Python Data Analysis Library. URL: <http://pandas.pydata.org> (дата обращения: 18.10.2025).
6. NumPy v2.3 Documentation. URL: <http://numpy.org/doc/2.3> (дата обращения: 18.10.2025).
7. SciPy v1.16.2 Documentation. URL: <http://docs.scipy.org/doc/scipy> (дата обращения: 18.10.2025).
8. PyOD V2 Documentation. URL: <http://pyod.readthedocs.io> (дата обращения: 18.10.2025).
9. Matplotlib: Visualization with Python. URL: <http://matplotlib.org> (дата обращения: 18.10.2025).

10. Seaborn: Statistical Data Visualization. URL: <http://seaborn.pydata.org> (дата обращения: 18.10.2025).
11. Plotly Open Source Graphing Library for Python. URL: <http://plotly.com/python> (дата обращения: 18.10.2025).
12. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Autoencoders // Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge (MA): MIT Press, 2016. Pp. 499–523.
13. Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. // Science. 2006. Vol. 313, Iss. 5786. Pp. 504–507. DOI: 10.1126/science.112764.
14. Credit Card Fraud Detection: Anonymized Credit Card Transactions Labeled as Fraudulent or Genuine // Kaggle. URL: <http://www.kaggle.com/datasets/mlg-ulb/creditcardfraud> (дата обращения: 18.10.2025).
15. The Numenta Anomaly Benchmark // GitHub. URL: <http://github.com/numenta/NAB> (дата обращения: 18.10.2025).
16. Imbalanced-learn v0.14.0 Documentation. URL: <http://imbalanced-learn.org> (дата обращения: 18.10.2025).
17. Макшанов А. В., Журавлев А. Е., Тындыкарь Л. Н. Большие данные. Big Data: учебник для вузов. 4-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 188 с.
18. Фельдман Е. В., Ручай А. Н., Чербаджи Д. Ю. Модель выявления аномальных банковских транзакций на основе машинного обучения // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2021. № 1 (39). С. 27–35. DOI: 10.14529/secur210104.
19. Novelty and Outlier Detection — Scikit-learn 1.7.2 Documentation. URL: http://scikit-learn.org/stable/modules/outlier_detection.html (дата обращения: 18.10.2025).

Дата поступления: 29.10.2025

Решение о публикации: 22.11.2025

Anomaly Detection in Large-Scale Data Using Isolation Forest and Autoencoder

- Maksim Gerasimov** — 3rd year Bachelor's Degree Student in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: intellectual information systems, machine learning. E-mail: maxger60@gmail.com
- Andrey V. Zabrodin** — PhD in History, Associate Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, data analytics, database design, web development, cloud technologies. E-mail: zabrodin@pgups.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Gerasimov M., Zabrodin A. V. Anomaly Detection in Large-Scale Data Using Isolation Forest and Autoencoder. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 17–25. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-17-25. (In Russian)

Abstract. Purpose: *the study aims to compare two anomaly detection methods applied to large-scale datasets, the ensemble-based Isolation Forest and the neural network-based Autoencoder. Methods:* *the investigation entailed modelling and empirical assessment of the algorithms utilizing a genuine credit card transaction dataset. Standard performance metrics such as precision, recall, F1-score, ROC-AUC were used accompanied by a confusion matrix to explore the occurrences of false positives and overlooked anomalies. Results:* *the findings revealed that both models achieved elevated ROC-AUC scores, confirming their robustness in differentiating between typical and anomalous transactions. Practical significance:* *the proposed methods can be suitable for the automated supervision of transactional flows, the prevention of fraud, and the analysis of large datasets. The integration of Isolation Forest and Autoencoder in hybrid systems has demonstrated superior effectiveness, enhancing detection accuracy while minimizing the occurrence of false positives in anomaly detection.*

Keywords: *large datasets, machine learning, anomalies, machine learning, neural network, Autoencoder, Isolation Forest, transaction data*

REFERENCES

1. Shkodyrev V. P., Yagafarov K. I., Bashtovenko V. A., Ilyina E. E. Obzor metodov obnaruzheniya anomalii v potokakh dannykh [The Overview of Anomaly Detection Methods in Data Streams], *Proceedings of the Second Conference on Software Engineering and Information Management (SEIM-2017), Saint Petersburg, Russia, April 21, 2017. CEUR Workshop Proceedings*, 2017, Vol. 1864, Pp. 50–56. (In Russian)
2. Barsegyan A. A., Kupriyanov M. S., Kholod I. I., et al. Analiz dannykh i protsessov: uchebnoe posobie [Data and Process Analysis: A Tutorial]. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publishing House, 2009, 512 p. (In Russian)
3. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z.-H. Isolation Forest, *Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, December 15–19, 2008*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, Pp. 413–422. DOI: 10.1109/ICDM.2008.17.
4. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Available at: <http://scikit-learn.org> (accessed: October 18, 2025).
5. Pandas: Python Data Analysis Library. Available at: <http://pandas.pydata.org> (accessed: October 18, 2025).
6. NumPy v2.3 Documentation. Available at: <http://numpy.org/doc/2.3> (accessed: October 18, 2025).
7. SciPy v1.16.2 Documentation. Available at: <http://docs.scipy.org/doc/scipy> (accessed: October 18, 2025).
8. PyOD V2 Documentation. Available at: <http://pyod.readthedocs.io> (accessed: October 18, 2025).
9. Matplotlib: Visualization with Python. Available at: <http://matplotlib.org> (accessed: October 18, 2025).
10. Seaborn: Statistical Data Visualization. Available at: <http://seaborn.pydata.org> (accessed: October 18, 2025).
11. Plotly Open Source Graphing Library for Python. Available at: <http://plotly.com/python> (accessed: October 18, 2025).
12. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Autoencoders. In: *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning*. Cambridge (MA), MIT Press, 2016, Pp. 499–523.
13. Hinton G. E., Salakhutdinov R. R., *Science*, 2006, Vol. 313, Iss. 5786, Pp. 504–507. DOI: 10.1126/science.112764.
14. Credit Card Fraud Detection: Anonymized Credit Card Transactions Labeled as Fraudulent or Genuine, *Kaggle*. Available at: <http://www.kaggle.com/datasets/mlg-ulb/creditcardfraud> (accessed: October 18, 2025).
15. The Numenta Anomaly Benchmark, *GitHub*. Available at: <http://github.com/numenta/NAB> (accessed: October 18, 2025).
16. Imbalanced-learn v0.14.0 Documentation. Available at: <http://imbalanced-learn.org> (accessed: October 18, 2025).
17. Makshanov A. V., Zhuravlev A. E., Tyndykar L. N. Bolshie dannye. Big Data: uchebnyk dlya vuzov [Big Data. Big Data: a textbook for universities]. Saint Petersburg, LAN Publishing House, 2024, 188 p. (In Russian)
18. Feldman E. V., Ruchay A. N., Cherbadzhi D. Y. Model vyyavleniya anomalnykh bankovskikh tranzaktsiy na osnove mashinnogo obucheniya [Model for Detecting Abnormal Banking Transactions Based on Machine Learning], *Vestnik UrFO. Bezopasnost v informatsionnoy sfere [Journal of the Ural Federal District. Information Security]*, 2021, No. 1 (39), Pp. 27–35. DOI: 10.14529/secur210104. (In Russian)
19. Novelty and Outlier Detection — Scikit-learn 1.7.2 Documentation. Available at: http://scikit-learn.org/stable/modules/outlier_detection.html (accessed: October 18, 2025).

Received: 29.10.2025

Accepted: 22.11.2025

УДК 004.932.2

Развитие систем визуальной навигации для беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия GPS-сигнала

Злобин Сергей Евгеньевич — адъюнкт кафедры математического и программного обеспечения. Научные интересы: системы искусственного интеллекта, беспилотные летательные аппараты, многоагентное управление. E-mail: zlobincergey15@gmail.com

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Злобин С. Е. Развитие систем визуальной навигации для беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия GPS-сигнала // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 26–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-26-32

Аннотация. Традиционные системы навигации беспилотных летательных аппаратов полагаются на GPS-сигнал, который подвержен подавлению или фальсификации в условиях радиоэлектронной борьбы, плотной городской застройке или естественных помех, что приводит к потере ориентации, срыву задач и возможной утрате аппарата. Визуальная навигация на основе камер и алгоритмов обработки изображений предлагает альтернативу, но сталкивается с вызовами в динамичных средах без спутниковых сигналов. **Цель:** провести анализ эволюции методов визуальной навигации БПЛА при отсутствии GPS-сигнала, включая обзор ключевых технологий, их интеграцию с инерциальными системами и искусственным интеллектом, а также оценить преимущества, вызовы и перспективы применения методов визуальной навигации с акцентом на коллаборативные подходы в многоагентных системах. **Результаты:** выявлен рост интереса к визуальной навигации с фокусом на VSLAM — для оценки апостериорной вероятности траектории и карты, визуальной одометрии — для минимизации репроекционной ошибки, многосенсорной фузии через расширенный фильтр Калмана — для обеспечения метровой точности в сложных средах. Интеграция ИИ, включая сверточные нейронные сети, повышает устойчивость к изменениям освещения и обеспечивает адаптацию к различным ситуациям в реальном времени. В многоагентных системах кооперативные модели SLAM с матрицами корреспонденций между картами агентов снижают среднеквадратичную ошибку позиционирования до одного метра в симуляциях, даже при прерывистой связи и потере сигнала GPS. **Практическая значимость:** результаты позволяют повысить автономность БПЛА в сценариях без GPS, включая поисково-спасательные операции в урбанизированных зонах, мониторинг сельскохозяйственных угодий, экологический контроль и различные задачи с возможностью применения средств радиоэлектронной борьбы, обеспечивая координированные действия групп БПЛА для эффективного покрытия территории и минимизации рисков при выполнении задач.

Ключевые слова: визуальная навигация, БПЛА, среды без GPS-сигнала, одновременная локализация и построение карты, многоагентные технологии

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки); **1.2.2** — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); **2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяются в различных сферах, включая мониторинг окружающей среды, поисково-спасательные операции, сельскохозяйственные работы и т. д., обеспечивая выполнение задач без непосредственного участия человека. Традиционные системы навигации, основанные на глобальной позиционной системе (GPS), уязвимы для электронного противодействия, например подавления или фальсификации сигнала. В условиях, где средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ) или естественные помехи (например, в плотной городской застройке или под землей) приводят к потере GPS-сигнала, БПЛА рискуют потерять ориентацию, что может привести к срыву выполнения задачи или к потере аппарата.

Визуальная навигация, базирующаяся на камерах и алгоритмах обработки изображений, представляет собой эффективную альтернативу, позволяющую БПЛА определять положение по визуальным ориентирам окружающей среды. Данная технология приобретает особую актуальность в сценариях без GPS-сигнала, способствуя повышению автономности аппаратов. Согласно обзорам, развитие визуальных систем навигации стимулируется интеграцией с искусственным интеллектом (ИИ) и многосенсорными подходами [1]. Целью статьи является анализ эволюции этих систем, их интеграции в платформы БПЛА, анализ перспектив развития, в том числе коллаборация с многоагентным подходом.

Обзор литературы

Анализ научных публикаций свидетельствует о растущем интересе к визуальной навигации БПЛА в средах без GPS-сигнала. В русскоязычных источниках подчеркивается роль ИИ в оптимизации алгоритмов, обеспечивающих автономное преодоление препятствий и корректировку траектории на основе визуальных данных [2]. Разработки акцентируют внимание на интеграциях с другими системами для обеспечения контроля в удаленных зонах, включая сценарии с подавленным GPS-сигналом, такие как городские операции или арктические исследования [3].

Ключевые работы описывают методики сопоставления ключевых точек на изображениях для определения положения БПЛА без GPS с использованием алгоритмов компьютерного зрения [2]. Другие исследования фокусируются на визуальной навигации групп БПЛА по маркерам в условиях отсутствия спутниковых сигналов [4]. Обсуждаются такие методы, как визуальная одометрия и одновременная локализация и построение карты (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM) для автономного перемещения в сложных средах с интеграцией инерциальных систем для повышения надежности [5]. В международных обзорах подчеркивается эволюция от монокулярных систем к многосенсорным с акцентом на вызовы в средах без GPS-сигнала [1, 5].

Ключевые технологии визуальной навигации

Визуальная навигация БПЛА опирается на комплекс компонентов, обеспечивающих точное определение положения и траектории при отсутствии GPS-сигнала. Рассмотрим основные технологии.

1. Сенсорная база. Монокулярные, стереоскопические или камеры с датчиками глубины дополняются лидарами или радарными для многосенсорной фузии (объединения) данных. В конфигурациях БПЛА предпочтительны компактные камеры высокого разрешения с инфракрасным диапазоном для проведения операций в условиях низкой освещенности. Интеграция с инерциальными измерительными устройствами (IMU) компенсирует вибрации и ускорения, как показано в работах по навигации БПЛА без спутниковых сигналов [5].

2. Алгоритмы обработки изображений. Центральной технологией выступает визуальная одновременная локализация и построение карты (VSLAM), где ключевые точки извлекаются из последовательных кадров и сопоставляются для расчета перемещения. Математическая основа VSLAM часто формулируется как задача оценки апостериорной вероятности траектории $x_{1:t}$ и карты m по наблюдениям $z_{1:t}$ и управляющим сигналам $u_{1:t}$ [6]:

$$p(x_{1:t}, mz_{1:t}, u_{1:t}) = p(x_1) \prod_{k=2}^t p(x_k | x_{k-1}, u_k) \times \\ \times \prod_{k=1}^t p(z_k | x_k, m),$$

где $p(x_k | x_{k-1}, u_k)$ — модель движения;
 $p(z_k | x_k, m)$ — модель наблюдений.

Алгоритмы обеспечивают точность в динамичных средах, устойчивость к изменениям освещения и интеграцию с ИИ для семантической сегментации [5]. Визуальная одометрия оценивает относительное перемещение на основе последовательностей изображений, часто комбинируясь с IMU в системах с визуально-инерциальной одометрией для минимизации дрейфа. Математически это сводится к минимизации репроекции ошибки [5]:

$$\min_{R, t} \sum_i \pi(K(Rp_i + t)) - q_i^2,$$

где R — матрица поворота;
 t — вектор трансляции;
 p_i и q_i — сопоставленные точки в двух кадрах;
 K — матрица калибровки камеры;
 π — функция проекции.

Применение этих методов в открытых пространствах, включая леса и урбанизированные зоны, с фокусом на устойчивость к внешним факторам демонстрируется в [7].

3. Интеграция с ИИ и машинным обучением. Нейронные сети, например сверточные, используются для предсказания траекторий, распознавания ориентиров и адаптации к изменяющимся условиям. В системах ИИ обеспечивается навигация без GPS путем анализа визуальных данных в реальном времени, что критично для автономных задач [5]. Глубокое обучение повышает точность в сценариях без спутникового сигнала, включая использование нейроморфных камер для имитации биологического зрения [1].

4. Многосенсорная фузия. Визуальная навигация комбинируется с инерциальными, барометрическими или магнитными методами навигации для повышения надежности и точности определения местоположения БПЛА. Гибридные системы используют маркеры для коррекции в крупных структурах, достигая метровой точности. Мате-

матическая основа фузии часто реализуется через расширенный фильтр Калмана (EKF), где состояние $\hat{x}_{k|k-1}$ предсказывается как

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_k), \\ P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k$$

с последующей коррекцией по измерениям z_k [8]:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \\ \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - h(\hat{x}_{k|k-1})),$$

где f и h — функции перехода и измерений;

F_k и H_k — их якобианы;

Q_k и R_k — ковариационные матрицы шумов.

Обзоры подчеркивают преимущества фузии для БПЛА в сложных средах, таких как подземные помещения или мостовые конструкции [5].

В бортовых системах эти технологии интегрируются в автопилоты, обеспечивая плавный переход к визуальной навигации при отсутствии GPS-сигнала.

Применение в различных областях

Визуальная навигация повышает автономность БПЛА, делая их устойчивыми к помехам. Ключевые сценарии включают:

1. Мониторинг и поисково-спасательные операции. В урбанизированных или природных зонах БПЛА используют визуальное распознавание для поиска объектов, опираясь на оптические данные без GPS-сигнала [5]. Это актуально для чрезвычайных ситуаций, где требуется быстрая корректировка траектории.

2. Сельскохозяйственные и экологические задачи. Автономная визуальная навигация позволяет отслеживать посевы или лесные массивы в зонах с подавленным сигналом, повышая эффективность выполнения задач [1].

Во всех областях соблюдаются строгие стандарты безопасности, включая защиту от киберугроз.

Вызовы и перспективы развития

Несмотря на достижения, визуальная навигация сталкивается с ограничениями:

1. Вычислительная сложность. Обработка большого объема визуальной информации в реальном времени требует значительных ресурсов, увеличивая массу и энергопотребление БПЛА. Решения данной проблемы включают краевые вычисления с графическими процессорами [1].

2. Устойчивость к внешним факторам. Вариации освещения, погоды или динамики влияют на точность определения местоположения, в случае сильного изменения ландшафта возможна потеря управления БПЛА. Перспективы развития связаны с гибридными системами ИИ для адаптации к сложным погодным условиям [5]. Одним из частных решений данной проблемы является коллаборация методов визуальной навигации с методами многоагентного управления группами БПЛА.

Коллаборативная визуальная навигация в многоагентных системах

Перспективным направлением является переход от одиночного автономного управления отдельными БПЛА к многоагентному групповому управлению (роем БПЛА), где автономные агенты обмениваются данными для коллективной локализации. В сценарии, когда один БПЛА из-за внешних факторов не может определить опорные точки в зоне видимости, другие агенты, успешно выполнившие VSLAM, передают корректирующие данные о координатах и карте. Это позволяет рою решать задачу навигации в условиях потери GPS-сигнала, воздействия РЭБ или в сложных погодных условиях за счет распределенной одновременной локализации и построения карты. Математическая модель такой системы может быть расширена на основе стандартной одновременной локализации и построения карты, включая совместную оценку состояний агентов $x_{1:t}^{(i)}$ для N БПЛА [6]:

$$p(\{x_{1:t}^{(i)}\}_{i=1}^N, m \mid \{z_{1:t}^{(i)}\}_{i=1}^N, \{u_{1:t}^{(i)}\}_{i=1}^N, c) = \prod_{i=1}^N p(x_{1:t}^{(i)}, m^{(i)} \mid z_{1:t}^{(i)}, u_{1:t}^{(i)}) p(c \mid \{m^{(i)}\}_{i=1}^N),$$

где $m^{(i)}$ — локальная карта i -го агента;

c — матрица корреспонденций между картами для фузии (например, через сопоставление ключевых точек).

При прерывистой связи используются децентрализованные протоколы (например, на базе сетей с ячеистой топологией), где агенты хранят кэш данных и синхронизируют карты при восстановлении связи. Такие модели уже тестируются в симуляциях и прототипах, но требуют решения проблем с задержками и энергопотреблением [7]. В экспериментах с двумя квадрокоптерами в симулированной среде кооперативная система обеспечила ограничение ошибок положения (среднеквадратичная ошибка около 0,5 м по оси x) даже при увеличении высоты, в то время как одиночные конфигурации показывали рост ошибок до 2–3 м [6]. В реальных тестах в лесной местности система позволила менее оснащенной БПЛА преодолевать расстояния 31–41 м с успешностью 100 % [7]. В другом исследовании с тремя конфигурациями кооперативной одновременной локализации и построения карты в симуляции достигнута среднеквадратичная ошибка положения менее 1 м в сценариях без GPS-сигнала [8].

Будущие направления развития предусматривают интеграцию VSLAM с квантовыми сенсорами и интеллектом роя для совместного построения карт. Прогнозируется, что к 2030 году визуальная навигация станет стандартом для большинства БПЛА [1].

Заключение

Визуальная навигация для беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия GPS-сигнала является ключевым направлением, повышающим автономность и надежность систем в сложных средах. Современные технологии, такие как визуальная одновременная локализация и построение карты, визуальная одометрия, многосенсорная фузия и интеграция с искусственным интеллектом, позволяют БПЛА ориентироваться по визуальным ориентирам, обеспечивая точность в урбанизированных зонах, лесах и подземных структурах. Эти методы применяются в мониторинге окружающей среды, поисково-спасательных операциях, сельском хозяйстве и других задачах.

Особое значение имеет коллаборативная визуальная навигация в многоагентных системах, где

агенты обмениваются данными для коллективной локализации. В сценариях с потерей видимости опорных точек один БПЛА может получать корректировки от других, используя расширенные модели SLAM с матрицами корреспонденций между картами. Это минимизирует ошибки позиционирования даже при прерывистой связи благодаря децентрализованным протоколам и кэшированию данных.

Несмотря на преимущества, остаются вызовы: вычислительная сложность, влияние внешних факторов (освещение, погода). Перспективы включают интеграцию ИИ для адаптации, квантовых сенсоров и интеллекта роя. Дальнейшие исследования фокусируются на оптимизации и безопасности для полного раскрытия потенциала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A Review of UAV Autonomous Navigation in GPS-Denied Environments / Y. Chang, Y. Cheng, U. Manzoor, J. Murray // *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 170. Art. No. 104533. 23 p. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Степанов Д. Н. Методики сопоставления особых точек в задаче визуальной навигации БПЛА // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. 2015. Т. 4, № 4. С. 32–47. DOI: 10.14529/cmse150402.
3. Али Б., Садеков Р. Н., Цодокова В. В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // *Гироскопия и навигация*. 2022. Т. 30, № 4 (119). С. 87–105. DOI: 10.17285/0869-7035.00105.
4. Корсаков М. П., Гончарова Е. В., Курносков И. А., Замараев И. В. Обзор методов визуальной навигации и алгоритмов планирования пути для беспилотных летательных аппаратов // *Главный механик*. 2024. № 6.
5. GNSS-Denied Unmanned Aerial Vehicle Navigation: Analyzing Computational Complexity, Sensor Fusion, and Localization Methodologies / I. Jarraya, A. Al-Batati, M. B. Kadri [et al.] // *Satellite Navigation*. 2025. Vol. 6. Art. No. 9. 32 p. DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.
6. Cooperative Monocular-Based SLAM for Multi-UAV Systems in GPS-Denied Environments / J.-C. Trujillo, R. Munguia, E. Guerra, A. Grau // *Sensors*. 2018. Vol. 18, Iss. 5. Art. No. 1351. 24 p. DOI: 10.3390/s18051351.
7. Drones Guiding Drones: Cooperative Navigation of a Less-Equipped Micro Aerial Vehicle in Cluttered Environments / V. Pritzl, M. Vrba, Y. Stasinchuk [et al.] // *Proceedings of the 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (Abu Dhabi, United Arab Emirates, 14–18 October 2024). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. Pp. 10597–10604. DOI: 10.1109/IROS58592.2024.10802770.
8. Visual-Based SLAM Configurations for Cooperative Multi-UAV Systems with a Lead Agent: An Observability-Based Approach / J.-C. Trujillo, R. Munguia, E. Guerra, A. Grau // *Sensors*. 2018. Vol. 18, Iss. 12. Art. No. 4243. 30 p. DOI: 10.3390/s18124243.

Дата поступления: 20.11.2025

Решение о публикации: 25.11.2025

Development of Visual Navigation Systems for Unmanned Aerial Vehicles in Environments Lacking GPS Signals

Sergey E. Zlobin — Adjunct at the Department of Mathematical and Software Support. Research interests: artificial intelligence systems, unmanned aerial vehicles, multi-agent control.
E-mail: zlobincerger15@gmail.com

Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

For citation: Zlobin S. E. Development of Visual Navigation Systems for Unmanned Aerial Vehicles in Environments Lacking GPS Signals. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 26–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-26-32. (In Russian)

Abstract. *Traditional navigation systems for unmanned aerial vehicles (UAVs) rely on GPS signals, which can be susceptible to jamming or spoofing under electronic warfare conditions, in densely populated urban areas, or due to natural electromagnetic interference. This vulnerability can lead to disorientation, mission interruptions, and even the loss of the vehicle. An alternative to GPS is visual navigation, which utilizes cameras and image processing algorithms. However, this method faces difficulties in rapidly changing environments without satellite signals. **Purpose:** to analyze the evolution of visual navigation methods for UAVs in scenarios lacking GPS signals. This will include a discussion on key technologies, their integration with inertial navigation systems and artificial intelligence, as well as an assessment of their benefits, challenges, and application prospects, with an emphasis on collaborative approaches in multi-agent systems. **Results:** there is an increasing interest in visual navigation, with a focus on VSLAM for estimating the posterior probability of trajectories and maps, visual odometry aimed at minimizing reprojection errors, and the integration of multi-sensor fusion through extended Kalman filters to achieve meter-level accuracy in complex environments. The incorporation of artificial intelligence, especially convolutional neural networks, enhances resilience to illumination variations and facilitates real-time adaptability. In the context of multi-agent systems, cooperative SLAM models with correspondence matrices among agent maps have demonstrated the capability to reduce the root-mean-square positioning error to below 1 meter in simulations, even amid intermittent communication and loss of GPS. **Practical significance:** these findings enhance UAV autonomy in scenarios lacking GPS signals, such as search-and-rescue operations in urban areas, monitoring of agricultural lands, environmental control, and specific tasks related to electronic warfare, thereby ensuring coordinated swarm actions for efficient territorial coverage and risk mitigation.*

Keywords: *visual navigation, UAV, GPS-denied environments, simultaneous localization and mapping, multi-agent technologies*

REFERENCES

1. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A Review of UAV Autonomous Navigation in GPS-Denied Environments, *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, Vol. 170, Art. No. 104533, 23 p. DOI: 10.1016/j.robot.2023.104533.
2. Stepanov D. N. Metodiki sopostavleniya osobykh toчек v zadache vizualnoy navigatsii BPLA [Techniques of Feature Points Matching in the Problem of UAV's Visual Navigation], *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Vychislitel'naya matematika i informatika" [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computational Mathematics and Software Engineering"]*, 2015, Vol. 4, No. 4, Pp. 32–47. DOI: 10.14529/cmse150402. (In Russian)

3. Ali B., Sadekov R. N., Tsodokova V. V. Algoritmy navigatsii bespilotnykh letatelnykh apparatov s ispolzovaniem sistem tekhnicheskogo zreniya [A Review of Navigation Algorithms for Unmanned Aerial Vehicles Based on Computer Vision Systems], *Giroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation]*, 2022, Vol. 30, No. 4 (119), Pp. 87–105. DOI: 10.17285/0869-7035.00105. (In Russian)
4. Korsakov M. P., Goncharova E. V., Kurnosov I. A., Zamaraev I. V. Obzor metodov vizualnoy navigatsii i algoritmov planirovaniya puti dlya bespilotnykh letatelnykh apparatov [Review of Visual Navigation Methods and Path Planning Algorithms for Unmanned Aerial Vehicles], *Glavnyy mekhanik [Chief Mechanical Engineer]*, 2024, No. 6. (In Russian)
5. Jarraya I., Al-Batati A., Kadri M. B., et al. GNSS-Denied Unmanned Aerial Vehicle Navigation: Analyzing Computational Complexity, Sensor Fusion, and Localization Methodologies, *Satellite Navigation*, 2025, Vol. 6, Art. No. 9, 32 p. DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.
6. Trujillo J.-C., Munguia R., Guerra E., Grau A. Cooperative Monocular-Based SLAM for Multi-UAV Systems in GPS-Denied Environments, *Sensors*, 2018, Vol. 18, Iss. 5, Art. No. 1351, 24 p. DOI: 10.3390/s18051351.
7. Pritzl V., Vrba M., Stasinchuk Y., et al. Drones Guiding Drones: Cooperative Navigation of a Less-Equipped Micro Aerial Vehicle in Cluttered Environments, *Proceedings of the 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 14–18, 2024*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024, Pp. 10597–10604. DOI: 10.1109/IROS58592.2024.10802770.
8. Trujillo J.-C., Munguia R., Guerra E., Grau A. Visual-Based SLAM Configurations for Cooperative Multi-UAV Systems with a Lead Agent: An Observability-Based Approach, *Sensors*, 2018, Vol. 18, Iss. 12, Art. No. 4243, 30 p. DOI: 10.3390/s18124243.

Received: 20.11.2025

Accepted: 25.11.2025

УДК 656.2:004.942

Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли

Зуев Денис Владимирович — канд. техн. наук, генеральный директор. Научные интересы: нейронные сети, цифровые двойники. E-mail: zuevdv@gmail.com

ООО «Синтез АТ», Россия, 199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр., д. 28/29

Для цитирования: Зуев Д. В. Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 33–46. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-33-46

Аннотация. Представлен обзор развития интеллектуальных транспортных систем в железнодорожной сфере, центральным элементом которых стала технология цифровых двойников инфраструктуры и подвижного состава. Актуальность темы обусловлена глобальной цифровой трансформацией железнодорожной отрасли, направленной на повышение безопасности, надежности и эффективности перевозочного процесса. **Цель:** провести сравнительный анализ ключевых проектов, технологических решений и подходов к внедрению цифровых двойников в Европейском союзе, Китае и России, а также определить их роль в повышении эксплуатационных показателей. **Методы:** рассмотрены инициативы Европейского союза (Shift2Rail, Europe's Rail) с акцентом на стандартизацию и предиктивное обслуживание, масштабные государственные программы Китая (Digital Railway Plan до 2035 г.), отличающиеся высокой скоростью и комплексной интеграцией технологий (BIM, 5G-R), а также российский прагматичный подход ОАО «РЖД» (АСУ BIM, «Умный локомотив», цифровой двойник сортировочной станции), направленный на постепенное интеллектуальное управление активами к 2030 году. Сделан вывод, что все регионы используют единый технологический базис (BIM-платформы, IoT/5G-сети, AI/ML-аналитика и симуляционные модели). **Результаты:** подтверждают, что цифровые двойники обеспечивают раннее обнаружение дефектов и прогнозно-превентивное обслуживание, что ведет к снижению аварийности, повышению надежности, сокращению неплановых простоев до 30 % и экономической эффективности, снижению расходов на обслуживание до 30 % и оптимизации операций.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, цифровой двойник, железнодорожная инфраструктура, BIM-моделирование, предиктивное обслуживание, искусственный интеллект, надежность, эффективность

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **1.2.2** — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); **2.3.6** — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Введение

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) — это совокупность современных цифровых технологий (коммуникации, датчики, вычислительные системы) для сбора и обработки данных о состоянии транспортной системы, управ-

ления движением и информирования участников перевозочного процесса [1]. В железнодорожной отрасли ИТС охватывают цифровизацию управления движением поездов, мониторинг состояния инфраструктуры и подвижного состава, системы

автоматического управления и поддержки принятия решений. За последние 5–10 лет железные дороги активно внедряют IoT-сенсоры, системы связи (4G/5G), искусственный интеллект (ИИ) и большие данные для повышения эффективности и безопасности перевозок.

Одним из ключевых направлений цифровой трансформации стала технология «цифровых двойников» — виртуальных моделей объектов инфраструктуры и техники, позволяющих в реальном времени отражать состояние физической системы и прогнозировать ее поведение. Цифровой двойник — это программная интерактивная копия реального объекта или процесса, полностью имитирующая его характеристики и поведение [2]. Работая с цифровым двойником, можно управлять жизненным циклом объекта: проводить виртуальные испытания и оптимизацию, мониторить состояние в режиме реального времени и предсказывать будущие изменения [3]. В железнодорожной сфере цифровые двойники применяются для моделирования инфраструктуры (пути, станции, мосты), подвижного состава (локомотивы, вагоны), технологических процессов (график движения, сортировка вагонов) и даже окружающей среды. Эта технология стала глобальным трендом цифровизации транспорта: ведущие железнодорожные компании рассматривают цифровые двойники как инструмент для улучшения проектирования, эксплуатации и обслуживания объектов [4]. Ниже рассмотрены ключевые проекты внедрения цифровых двойников инфраструктуры в Европейском союзе, Китае и России, используемые технологические решения, сравнительный анализ подходов, а также тенденции развития и влияние на безопасность, надежность и эффективность.

Ключевые проекты и инициативы цифровых двойников по регионам

Европейский союз (ЕС)

В Европе за последнее десятилетие тема цифровых двойников железных дорог получила мощный импульс благодаря совместным научно-исследовательским инициативам. Программа Shift2Rail

(2014–2020) и ее преемник Europe's Rail Joint Undertaking (с 2021) объединили производителей, операторов и научные организации для разработки инноваций. В рамках Shift2Rail были реализованы проекты по применению цифровых двойников в различных подсистемах железной дороги. Например, серии проектов X2Rail изучали цифровые модели для системы управления и сигнализации, проекты Pivot — для подвижного состава, In2Track — для инфраструктуры, In2Stempo — для энергосистем [4]. Эти исследования показали, что цифровой двойник может существенно улучшить прогнозирование и контроль текущих и будущих показателей железнодорожных активов (рельсов, стрелочных переводов, локомотивов и пр.).

На основе результатов Shift2Rail новая стратегия Europe's Rail ставит целью создание интегрированного «железнодорожного цифрового двойника» всей системы. В опубликованной стратегической программе исследований одним из «трансформирующих» проектов назван Railway Digital Twin, Simulation and Virtualisation, предполагающий разработку единой платформы цифрового двойника, охватывающей все элементы — подвижной состав, инфраструктуру, энергоснабжение, сигнализацию — и их взаимосвязи. Планируется, что такая всеобъемлющая модель позволит отрасли постоянно улучшать детализацию и функциональность цифровых копий, чтобы не только понимать прошлое и настоящее состояния объектов, но и моделировать сценарии будущего с прогнозированием последствий для эксплуатации и обслуживания [4]. В итоге ожидается значительный эффект для проектирования развития железнодорожной системы и оптимизации ее работы.

Параллельно с программами ЕС Международный союз железных дорог (Union Internationale des Chemins de fer (фр.), UIC) ведет работу по стандартизации данных и моделей. UIC инициировал проект Railway Digital Modelling, целью которого является определение общего данного формата и онтологии для цифровых двойников железнодорожной системы (проект OntoRail) с учетом наработок таких инициатив, как IFC Rail, Eulynx, Linx4Rail и других. Создание единой универсальной модели железно-

дорожной системы (RailSystemModel, RSM) и словаря позволит разным организациям обмениваться цифровыми моделями инфраструктуры. Кроме того, в UIC сформированы рабочие группы по применению искусственного интеллекта (Artificial Intelligence, AI) — в первую очередь для предиктивного обслуживания на основе данных цифровых двойников [5]. Европейские железные дороги также внедряют цифровые модели на практике: так, компания Network Rail (Великобритания) и другие операторы создают цифровые двойники отдельных узлов (мостов, тоннелей, станций) для мониторинга их состояния, а Deutsche Bahn в Германии разрабатывает «цифровую железную дорогу» (Digital Rail Germany) с элементами виртуального моделирования сети. В Италии компания Italferr получила отраслевую награду за проект цифрового двойника железнодорожной инфраструктуры, используя платформу Bentley Systems [6]. Эти примеры подтверждают высокий интерес Европы к технологии цифровых двойников как к ключевому элементу ИТС на транспорте.

Китай

Железнодорожная отрасль Китая за последние годы совершила рывок в цифровизации, и технологии цифровых двойников заняли важное место в стратегиях развития. China State Railway Group (China Railway) в 2023 году опубликовала программу Digital Railway Plan, согласно которой к 2035 году планируется завершить цифровую трансформацию железных дорог Китая [7]. Промежуточные цели — существенно повысить уровень цифровизации к 2027 году, добиться «интеллектуализации» ключевых направлений и охватить цифровыми технологиями все основные бизнес-сценарии эксплуатации. Для реализации этих амбиций делается упор на развитие цифровой инфраструктуры связи и данных. В частности, Китай внедряет специализированную сеть 5G-R для железных дорог, однако признает, что ее возможностей недостаточно для всех потребностей «цифровой железной дороги», таких как передача массивов данных с поездов и «умное» обслуживание на основе цифровых двойников. Поэтому в опытной

эксплуатации задействуют технологии сверхширокополосной связи (например, миллиметрового диапазона), чтобы обеспечить высокоскоростную передачу данных от поездов. Так, корпорация ZTE совместно с China Mobile в 2023 году реализовали первый в отрасли проект планирования сети связи на основе цифрового двойника для высокоскоростной линии: была создана виртуальная модель маршрута и радиоканалов на участке Пекин — Тяньцзинь, что позволило оптимизировать размещение базовых станций 5G и улучшить качество покрытия без трудоемких полевых измерений [8]. Этот проект демонстрирует применение концепции двойника не только к физическим объектам, но и к сетям связи, обеспечивающим работу ИТС.

Китайские железные дороги активно используют BIM-технологии (Building Information Modeling) и цифровое моделирование при строительстве новых линий. Яркий пример — высокоскоростная магистраль Пекин — Чжанцзякоу, открытая к зимней Олимпиаде 2022 года, ставшая первой в Китае железнодорожной линией со сплошным применением BIM на всех этапах жизненного цикла [9]. Проектировщик, China Railway Engineering Corporation (CRECG), создал единую среду данных на платформе Bentley ProjectWise для междисциплинарной координации, 3D-моделирования и управления качеством строительства. В результате удалось сократить сроки проектирования на три месяца и снизить затраты; проект получил международную премию в номинации «Цифровой двойник рабочего процесса в сфере железных дорог» [9]. Кроме того, китайские исследовательские институты и компании разрабатывают цифровые двойники отдельных объектов инфраструктуры и подвижного состава. Так, например, создаются высокодетализированные 3D-модели крупных вокзалов (проект цифрового двойника нового вокзала Гуанчжоу), отрабатываются системы «цифровых депо» для управления парком высокоскоростных поездов и их обслуживанием, внедряются виртуальные симуляторы для подготовки машинистов. В сфере эксплуатации китайские железные дороги внедряют «умные» диспетчерские центры, где сводные цифровые модели всей сети помогают

управлять движением, особенно в условиях высокоинтенсивного сообщения. Таким образом, Китай сочетает масштабное государственное планирование (дорожная карта до 2035 года) с быстрым внедрением конкретных решений, от BIM на стройках до цифровых двойников в обслуживании и управлении перевозками [9].

Российская Федерация

В России внедрение цифровых технологий на железнодорожном транспорте также стало приоритетом последних лет. ОАО «РЖД» в своей цифровой трансформации одним из основных направлений называет создание цифрового двойника инфраструктуры. На уровне высшего руководства сформировано понимание, что технология цифровых двойников позволит повысить прозрачность процессов строительства и эксплуатации, тестировать новые решения и снизить затраты на содержание объектов [3]. В 2021 году на Объединенном ученом совете ОАО «РЖД» было объявлено, что компания создает корпоративную BIM-платформу (АСУ BIM), завершение которой планируется к 2024 году, после чего начнется разработка цифровых двойников объектов инфраструктуры, и к 2030 году РЖД рассчитывает перейти к интеллектуальному управлению активами с применением технологий искусственного интеллекта [10]. Фактически к 2030 году прогнозируется появление системы, где ИИ на основе данных цифрового двойника будет помогать управлять инфраструктурой и техническими средствами.

Уже сейчас в России реализуются пилотные проекты цифровых двойников. К примеру, разработана информационная система «цифровой двойник сортировочной станции», которая активно используется на федеральном уровне для управления работой крупных железнодорожных узлов [11]. Эта система моделирует процессы формирования и расформирования составов на сортировочной горке в виртуальной среде. Благодаря ей можно проигрывать различные сценарии маневров и операций без вмешательства в реальный процесс, что позволяет оптимизировать схемы роспуска вагонов и график работы станции. Циф-

ровой двойник сортировочного комплекса предоставляет диспетчерам и операторам ряд инструментов: сбор телеметрии с датчиков (прохождение вагонов, параметры состава) в режиме реального времени, визуализация на электронном диспетчерском табло, возможность задавать расписание прибытий/отправлений и автоматически рассчитывать оптимальный план сортировки. Система интегрирована с технологиями IoT (англ. *Internet of things* — интернет вещей) и позиционирования персонала: отслеживает местонахождение работников на станции через мобильные терминалы и с помощью встроенных алгоритмов ИИ предлагает оптимальное распределение бригад по задачам. В итоге, согласно отчетам, внедрение такого двойника позволило заказчику гибче реагировать на изменения, улучшить качество и скорость обработки вагонопотоков, удовлетворяя растущие требования рынка логистики [11].

Другой пример — проект «Умный локомотив» в РЖД. Это комплекс средств предиктивной аналитики для тягового подвижного состава, где применяются нейронные сети, IoT-датчики и цифровые модели узлов локомотива [12]. В реальном времени система оценивает техническое состояние ключевых агрегатов, выявляет аномалии в работе и прогнозирует износ. Цифровой двойник локомотива дает возможность перейти от планово-предупредительного ремонта к прогнозно-превентивному обслуживанию, когда замена детали проводится перед ожидаемым отказом, что повышает коэффициент готовности локомотивов и снижает расходы. Кроме того, РЖД развивает цифровые модели стационарных объектов (мостов, тоннелей) с использованием датчиков деформации, вибрации и температуры, данные с которых поступают в виртуальную модель для непрерывного мониторинга технического состояния сооружений. Российские научные организации (например, ВНИИЖТ, Российский университет транспорта) создали центры компетенций по цифровому управлению жизненным циклом инфраструктуры, где отрабатываются подходы к интеграции BIM, систем диагностики и цифровых двойников. Важным шагом стало введение с 2022 года нормативного требования, со-

гласно которому все новые проекты строительства ж/д объектов с госфинансированием должны выполняться с применением BIM-моделирования [12]. Это обеспечивает накопление актуальных цифровых моделей инфраструктуры, на основе которых затем формируются полноценные двойники для эксплуатации. В целом Россия следует мировым трендам: создается корпоративная платформа данных, реализуются пилоты цифровых двойников для повышения эффективности, и к началу 2030-х годов ожидается переход от локальных решений к масштабному интеллектуальному управлению сетью.

Технологические решения: платформы, стандарты и инструменты

Развитие цифровых двойников в железнодорожной ИТС опирается на комплекс передовых технологий.

Единые цифровые платформы и BIM

Базой для цифрового двойника инфраструктуры служат точные цифровые модели объектов. В отрасли широко внедряется BIM — информационное моделирование, обеспечивающее 3D/4D-модели путей, станций, инженерных сооружений. В ЕС разработан стандарт IFC Rail (расширение формата Industry Foundation Classes для железных дорог) для совместности BIM-моделей различных систем. Компании используют платформы (Bentley ProjectWise, Autodesk Tandem и др.) для хранения и совместной работы с модельными данными. Создание общих сред данных стало приоритетом: например, РЖД разрабатывает АСУ BIM как единую базу данных обо всех объектах инфраструктуры [13], а UIC продвигает OntoRail/Rail System Model для стандартизации описания железнодорожных элементов [5]. Эти платформы позволяют объединять разрозненные данные (чертежи, облака точек, GIS-информацию) в едином цифровом пространстве, необходимом для развертывания полноценного двойника.

Датчики, IoT и телематика

Физический мир «питает» цифровой двойник данными через сеть датчиков и систем связи. На путях и объектах устанавливаются тысячи сенсо-

ров (деформационные и температурные датчики, вибродатчики, счетчики осей, камеры и пр.), образуя промышленный интернет вещей. Например, в России ВНИИЖТ разработал беспроводные автономные датчики для мониторинга состояния земляного полотна, мостов и других объектов с передачей данных по IoT-сетям. Подвижной состав оснащается телематикой: бортовые модули собирают данные о работе компонентов локомотивов (давления, токи, температура узлов) и передают их в облачные хранилища. Для высокой пропускной способности применяются современные коммуникации: сети LTE/5G, спутниковые каналы. В Китае, как отмечалось, разворачивается 5G-R сеть для критически важных данных управления движением, дополняемая миллиметровыми радиолниями для массивных потоков данных (например, выгрузка за смену десятков гигабайт бортовых журналов локомотива) [8]. Телеизмерительные системы обеспечивают поступление оперативных данных в цифровой двойник, позволяя ему всегда соответствовать актуальному состоянию реальной инфраструктуры.

Искусственный интеллект и аналитика

Сами по себе данные ценны лишь при грамотной обработке. Поэтому в архитектуре ИТС используются модули AI/ML для анализа больших данных, получаемых от цифрового двойника. Алгоритмы машинного обучения выявляют скрытые закономерности в показаниях датчиков — предсказывают дефект рельса по еле заметным вибрационным аномалиям либо рассчитывают оставшийся ресурс подшипника колесной пары по динамике температуры. В Европе акцент сделан на предиктивную аналитику: так, Европейская ассоциация железнодорожной промышленности (UNIFE) и железнодорожные операторы отмечают, что одно из главных преимуществ цифрового двойника — возможность предугадывать отказ того или иного компонента и тем самым перейти к проактивному обслуживанию [3]. RZD Digital заявляет, что использование технологий двойников и AI позволяет в разы увеличить число тестовых сценариев и выявлять риски до их реализации на практике [12].

Также ИИ применяется для оптимизационных задач, например подбора оптимального графика движения поездов по результатам имитационных экспериментов или планирования ресурсов ремонтов так, чтобы минимизировать простой техники. Отдельное направление — компьютерное зрение: анализ изображений (с дронов, камер мониторинга) для оценки состояния объектов и обновления цифровой модели (например, автоматическое выявление просадок пути или трещин).

Модели и симуляция процессов

Цифровые двойники позволяют проводить многовариантное моделирование операций железной дороги. Программные комплексы симуляции (например, OpenTrack, AnyLogic, собственные разработки) интегрируются с данными двойника для проигрывания сценариев: от имитации движения поездов по расписанию до моделирования работы сортировочного узла. Благодаря этому железнодорожники могут «прокручивать» в виртуальной среде чрезвычайные ситуации, новые графики и технические решения. На цифровом полигоне можно проверить, как изменение расписания на узле повлияет на скопление вагонов или как модернизация контактной сети отразится на пропускной способности. Такие эксперименты снижают потребность в реальных испытаниях, экономя время и ресурсы [11]. Согласно европейским проектам, визуальная 3D/4D-среда цифрового двойника способствует улучшению межведомственного сотрудничества: инженеры, эксплуататоры и планировщики достигают лучшего взаимопонимания благодаря работе с единой моделью [6].

Стандарты и кибербезопасность

Для успешного функционирования ИТС требуется унификация протоколов и обеспечение безопасности данных. В железнодорожной отрасли принимаются стандарты обмена данными от датчиков (например, протоколы Rail IoT), форматы описания объектов (упомянутые IFC Rail, RailSystemModel и др.), стандарты на интерфейсы между системами управления. Поскольку цифровой двойник тесно связан с реальной ин-

фраструктурой, большое внимание уделяется кибербезопасности — защищенности каналов связи и хранилищ от несанкционированного доступа с целью предотвращения вмешательства в работу транспорта. ИТС-платформы строятся с учетом требований надежности (круглосуточная доступность, резервирование) и масштабируемости, ведь объем данных от тысяч объектов инфраструктуры чрезвычайно велик.

Вышеописанные технологические элементы в совокупности образуют экосистему, внутри которой цифровой двойник железной дороги может полноценно функционировать. Мониторинговые системы непрерывно снабжают его данными, стандартизованные модели обеспечивают совместимость, а инструменты AI и симуляции превращают данные в полезные решения. Все это ложится в основу интеллектуальных транспортных систем нового поколения.

Сравнительный анализ подходов и зрелости внедрения

Подходы к развитию цифровых двойников и ИТС в железнодорожной отрасли ЕС, Китая и России различаются, отражая особенности управления и приоритеты каждой из сторон.

Европейский союз

Характеризуется координированным научно-инновационным подходом. Большинство проектов реализуется консорциумами в рамках общеевропейских программ (Horizon 2020, Shift2Rail, Horizon Europe). Сильный акцент на стандартизации и интероперабельности: ЕС стремится создать единые архитектуры, чтобы цифровые решения были совместимы между разными странами и операторами. Зрелость внедрения неоднородна: отдельные операторы (например, SNCF, Deutsche Bahn, Network Rail) уже имеют реализованные цифровые двойники некоторых объектов и функций, тогда как общесистемный цифровой двойник еще в стадии исследований [6]. Европа продвинута в предиктивном техобслуживании, многие железные дороги используют системы диагностики с элементами цифровых моделей (например, циф-

ровой профиль пути для мониторинга износа). Однако процесс внедрения может замедлиться из-за необходимости согласования с многочисленными участниками и обеспечения соответствия единым нормам кибербезопасности ЕС [6]. В целом ЕС сейчас на этапе перехода от пилотов к масштабированию: в ближайшие 5 лет (до 2030 года) ожидается развертывание решений digital twin в рамках программы Europe's Rail по всей Европе.

Китай

Применяет государственно ориентированный, масштабный подход. Под эгидой правительства установлены четкие целевые показатели (полная цифровизация к 2035 г., ключевые успехи к 2027 г.). Благодаря централизованному руководству внедрение идет быстро и комплексно: при строительстве новых высокоскоростных линий сразу закладываются BIM и цифровые модели, одновременно модернизируется связь (5G-R) и центры обработки данных. Зрелость внедрения в отдельных аспектах очень высока: например, китайские высокоскоростные магистрали уже оснащены тысячами датчиков и камер, данные которых интегрированы в централизованные платформы. Интеллектуальные вокзалы и автоматизированное управление движением (АТО) в метрополитенах крупных городов показывают, как цифровые двойники используются для оптимизации пассажиропотоков и графиков. Отличительной чертой являются масштаб и интеграция: китайские проекты объединяют сразу множество технологий (IoT, AI, 5G, цифровой двойник) в единой системе. По уровню практического применения Китай в некоторых областях лидирует: например, системы автоматического диагностирования подвижного состава с цифровыми моделями узлов или платформы управления инфраструктурой на основе данных уже действуют на национальном уровне. К 2030-м годам прогнозируется полная интеграция большинства процессов в единый цифровой контур, при котором все элементы инфраструктуры будут представлены цифровыми двойниками, управляемыми в режиме реального времени. Ключевыми вызовами для Китая станут обеспечение безопасности столь масштабного киберфизического комплекса и подготов-

ка необходимого количества квалифицированных специалистов для работы с этими системами.

Россия

Следует эволюционному подходу, сочетая заимствование мировых лучших практик с учетом отечественной специфики. Зрелость внедрения пока точечная, имеются передовые пилоты (смарт-станции, «умные» локомотивы), но они не охватывают еще всю систему. Сильная сторона — наличие научных школ и понимание важности стандартизации: РЖД активно сотрудничает с университетами и НИИ, создает центры компетенций. Ограничивающим фактором могут быть финансовые и санкционные условия: доступность импортного программного обеспечения, оборудования сенсоров и т. п. Тем не менее РЖД декларирует приверженность мировому тренду и ставит амбициозные цели до 2030 года [10]. Российский подход можно назвать прагматичным: сначала создается фундамент (нормативная база BIM, единая платформа данных), затем запускаются пилотные проекты в ключевых наиболее окупаемых направлениях (грузовые узлы, локомотивы), и уже на основе результатов принимаются решения о масштабировании. Если ЕС движется через исследовательские консорциумы, Китай — через государственный план, то Россия — через корпоративную стратегию РЖД с постепенной цифровой трансформацией. К 2030 году разрыв в уровне зрелости может сократиться: Россия активно внедряет проверенные решения. В частности, в «РЖДстрой» используется опыт BIM-проектов Китая, а европейские наработки по предиктивному ремонту адаптируются для отечественных условий.

Общий вывод сравнения

Европейский союз лидирует в проработке стандартов и совместимости, Китай — в темпах и масштабе реальных внедрений, Россия — в таргетированной адаптации и интеграции решений в существующую систему. Все три региона признают ключевую роль цифровых двойников в будущей железной дороге, но идут к этой цели несколькими разными маршрутами. При этом наблю-

дается и сотрудничество: международные организации (УИС, академические союзы) обеспечивают обмен опытом между ЕС, Китаем и Россией, что способствует выработке лучших практик для всех.

Тенденции и направления развития

Анализируя последние 5–10 лет развития ИТС на железнодорожном транспорте, можно выделить несколько отчетливых тенденций и перспективных направлений, связанных с цифровыми двойниками инфраструктуры:

1. Предиктивная диагностика и обслуживание

Интеграция цифровых двойников с системами технической диагностики — один из главных трендов. Виртуальные модели инфраструктуры и поездов, непрерывно обновляемые данными датчиков, позволяют реализовать обслуживание по техническому состоянию. Например, двойник железнодорожного полотна, получая данные от дефектоскопных тележек и вибродатчиков, выявляет зарождающиеся дефекты рельсов или просадки балласта и сигнализирует о необходимости ремонта до того, как произойдет авария. Искусственный интеллект в этой связке играет роль движка предиктивной аналитики: он обрабатывает большие массивы исторических и текущих данных, чтобы спрогнозировать время отказа компонента. Таким образом, техническая служба получает раннее предупреждение о проблеме и может спланировать ремонт в удобное окно, а не в авральном режиме. Уже сейчас европейские железные дороги отмечают, что применение цифровых двойников в симуляции работы инфраструктуры помогает определить узлы и детали, находящиеся в зоне риска отказа [4]. В перспективе данная тенденция усилится: цифровые двойники станут основой для автономных систем диагностики, когда ИИ сам формирует заявки на обслуживание, заказывает запасные части и т. д. Для России и Китая это особенно актуально ввиду огромной сети: автоматизация диагностики через двойники позволит удерживать надежность инфраструктуры на высоком уровне при оптимальных затратах.

2. Диспетчеризация и управление движением

Цифровой двойник всей железнодорожной сети открывает новые возможности для диспетчерских центров. Традиционно диспетчеры опираются на телеметрию и регламенты, но с виртуальной копией сети они могут видеть динамическую модель трафика: где находится каждый поезд, состояние каждого участка пути, прогнозные конфликты в графике. Тенденция такова, что системы управления движением переходят от реактивных к проактивным. На основе данных двойника можно просчитывать наперед последствия тех или иных действий (например, задержку поезда из-за внеплановой остановки) и автоматически предлагать диспетчеру оптимальное решение (обходной маршрут, изменение приоритетов и т. п.). Китай внедряет элементы такого прогнозирующего управления на высокоскоростных линиях, где автоматизированные центры контроля используют симуляцию, чтобы увеличивать пропускную способность без ущерба пунктуальности. В России цифровой двойник сортировочной станции уже позволяет оптимизировать операции формирования составов и тем самым улучшать общее течение перевозочного процесса [11]. В будущем возможно появление «цифровых диспетчеров» — интеллектуальных модулей, способных в реальном времени перестраивать график движения сотен поездов, моделируя различные варианты на цифровом близнеце сети, прежде чем применять их на практике. Это прямо связано и с темой автоматического управления поездами: для безопасного внедрения беспилотных грузовых составов или автономных электричек необходима надежная виртуальная модель, на которой алгоритмы будут «обучаться» ведению движения. Таким образом, цифровой двойник станет неотъемлемой частью центра управления перевозками, повышая их адаптивность и устойчивость к сбоям.

3. Эксплуатационное планирование и оптимизация ресурсов

Еще одно направление — использование цифровых двойников для стратегического планирования инфраструктуры и перевозок. Виртуальная мо-

дель железной дороги позволяет проводить what-if анализ на уровне месяцев и лет: что будет, если увеличить скорость движения на участке, построить второй путь, запустить новый маршрут грузопотока? Имитация в цифровом пространстве дает ответы о влиянии на пропускную способность, износ, экономические показатели. Поэтому регуляторы и компании все активнее применяют двойники при разработке инвестиционных программ и расписаний. Европейский взгляд включает связь цифровых двойников с целями устойчивого развития — моделируя разные сценарии, железные дороги ищут пути повысить энергоэффективность и экологичность. Например, виртуальный полигон может просчитать экономию энергии при разных алгоритмах вождения поездов или оценить, как изменения в расписании снизят выбросы CO₂ за счет сокращения простоев локомотивов. В операционном плане цифровые двойники помогают оптимизировать использование подвижного состава и персонала. Уже реализованные системы (например, сортировочная станция в России) распределяют локомотивные бригады и маневровую технику более эффективно [4]. Эта тенденция будет углубляться с развитием нейросетевых рекомендационных систем. На основе данных о всех процессах (движение, ремонт, погрузка) ИТС будет подсказывать, как лучше составить план работы на сутки/неделю, куда направить дополнительный локомотив, где есть узкие места в графике и т. д. К 2030-м годам можно ожидать появления комплексных решений ОРМ (Operations Planning and Management) нового поколения, полностью основанных на цифровом двойнике инфраструктуры, который непрерывно синхронизирован с реальностью.

4. Интеграция смежных систем и «метаверс» инфраструктуры

Цифровые двойники в железнодорожной отрасли начинают тесно интегрироваться с другими информационными системами: АСУ предприятий, ГИС, городскими цифровыми платформами. Возникает концепция своеобразного «метаверса» транспортной инфраструктуры, где все объекты связаны цифровыми представительствами. В ЕС

инициатива Destination Earth (DestinE) предполагает создание цифровых моделей большей части инфраструктуры Европы, и железные дороги являются частью этой экосистемы [4]. Это открывает путь к интеграции ж/д двойников с умными городами, например совместное планирование в единой цифровой среде услуг городского транспорта и ж/д сообщения для оптимизации «последней мили» для пассажира. Другая смежная область — логистические цифровые платформы: железнодорожные двойники могут подключаться к цифровым цепочкам поставок, предоставляя информацию о движении грузов в реальном времени и прогнозируя сроки прибытия вагонов на терминалы. Такая интеграция улучшит прозрачность для клиентов и повысит конкурентоспособность железной дороги. Технологически это требует унификации протоколов (что и делают UIC/OSJD на международном уровне) и больших вычислительных мощностей, но тенденция ясно прослеживается: границы между отдельными ИТС стираются, формируется единое информационное пространство транспорта. В этом пространстве цифровой двойник ж/д инфраструктуры станет одним из ключевых узлов, связывающих железную дорогу с автомобилями (через интеллектуальные переезды, Intelligent Grade Crossings), энергетическими сетями (учет энергопотребления подвижного состава в энергосистеме), промышленностью (грузоотправители подключаются напрямую к планам движения поездов).

5. Повышение киберустойчивости и надежности моделей

По мере растущей зависимости перевозочного процесса от цифровых двойников усиливается тренд на обеспечение их надежности. Идет работа над методиками верификации и валидации моделей, чтобы виртуальная модель всегда адекватно отражала физическую реальность. Появляется понятие Technical Authority по цифровым двойникам: например, Европейское агентство по железным дорогам (ERA) обсуждает введение регламентации для цифровых моделей как элемента обеспечения безопасности (вплоть до сертификации критичных

алгоритмов ИИ). Таким образом, одна из тенденций — нормативное закрепление использования цифровых двойников. Вероятно, в ближайшие годы появятся стандарты, обязывающие применять цифровой двойник для сложных инфраструктурных проектов (аналогично тому, как BIM уже стал обязательным для бюджетного строительства в РФ [10]). Также развивается направление кибербезопасности: уделяется внимание защите данных цифровых двойников от искажений и атак, резервированию систем управления на случай сбоев цифровой модели. Все это важно для доверия к технологии и ее устойчивого развития.

Подводя итог, тенденции можно охарактеризовать коротко: умнее, связнее, предиктивнее. Железнодорожные ИТС с цифровыми двойниками стремятся быть более умными (AI для оптимизации и прогнозов), более связными (интеграция между системами и видами транспорта) и более предсказуемыми (превентивное обслуживание и планирование). Эти направления развития взаимно усиливают друг друга и ведут к трансформации традиционной железной дороги в высокотехнологичную систему управления жизненным циклом инфраструктуры.

Роль цифровых двойников в повышении безопасности, надежности и эффективности

Внедрение цифровых двойников инфраструктуры уже сейчас приносит ощутимые выгоды, а в перспективе кардинально повысит безопасность, надежность и эффективность управления железнодорожной сетью.

1. Безопасность

Цифровые двойники позволяют значительно улучшить безопасность движения и работ на транспорте. Во-первых, за счет раннего обнаружения дефектов: мониторинговые системы, интегрированные с виртуальной моделью, выявляют отклонения (начало разрушения рельса, просадка насыпи, сбой в оборудовании) на самой ранней стадии и подают сигнал, пока ситуация не переросла в отказ [11]. Это сокращает число аварий и инцидентов. Во-вторых, двойники дают возможность моделировать

аварийные ситуации и обучать персонал без риска для реальных людей и техники. Например, виртуальная тренировка действий при сходе подвижного состава или имитация пожара в тоннеле на цифровом полигоне позволяют отработать навыки оперативного реагирования. Как отмечается в [11], с помощью цифровых моделей можно проводить такие тренинги, что в итоге значительно повышает уровень безопасности на станции и магистрали. В-третьих, точная оценка состояния каждого элемента инфраструктуры благодаря цифровым двойникам позволяет снизить влияние человеческого фактора при оценке безопасности. Решения принимаются на основе объективных данных и ИИ-прогнозов, а не субъективных суждений. Наконец, система, предугадывающая события, делает движение более предсказуемым, снижая вероятность неожиданных ситуаций на путях. Все это ведет к снижению травматизма, аварийности и общему укреплению безопасности перевозок.

2. Надежность и бесперебойность работы

Надежность железнодорожной инфраструктуры определяется устойчивостью к отказам и способностью оперативно восстанавливать работоспособность. Цифровой двойник существенно повышает эти показатели. Благодаря предиктивной диагностике ремонтные бригады проводят замену оборудования перед наступлением отказа, то есть плановые простои заменяют внезапные поломки. Это повышает коэффициент готовности инфраструктуры и подвижного состава. Например, платформа «Умный локомотив» с цифровым двойником узлов уже сейчас позволяет отслеживать состояние агрегатов и автоматически выводить информацию о необходимости обслуживания до возникновения неисправности [12]. В результате локомотивы реже выходят из строя на линии. Сходным образом цифровые модели инженерных сооружений прогнозируют срок службы компонентов (балок моста, опор контактной сети) и рекомендуют оптимальное время их замены, предотвращая внезапные обрушения или обрывы проводов. Еще один аспект — устойчивость к внешним воздействиям: двойник может включать данные о погоде,

сейсмике, что позволяет заблаговременно принять меры (например, снизить скорость поездов при прогнозируемом перегреве рельсов или увеличить частоту осмотров перед сильным паводком). Тем самым надежность всей системы растет, так как она всегда подготовлена к ожидаемым воздействиям. Если же сбой все-таки произошел, цифровой двойник помогает быстрее восстановить работу: зная точное состояние и имея симуляционную модель, диспетчеры могут оперативно просчитать обходные варианты движения, а инженеры — найти корень проблемы. В совокупности, по оценкам RZD Digital, внедрение технологий цифрового двойника способно снизить затраты и потери от неплановых простоев до 30 % за счет повышения надежности и оптимизации процессов [12]. Надежная железная дорога — это пунктуальные поезда, довольные клиенты и стабильная работа без «узких мест», чего и позволяют добиться современные ИТС.

3. Эффективность и экономичность управления

Экономический эффект от цифровых двойников проявляется сразу в нескольких плоскостях. Прежде всего, это оптимизация операций. Виртуальные модели дают возможность находить наиболее эффективные способы организации перевозок. Как было показано на примере сортировочной станции, внедрение системы цифрового двойника позволило сократить время обработки вагонов и улучшить использование ресурсов, повысилась пропускная способность станции без дорогостоящих капитальных вложений [11]. Подобные оптимизационные задачи, решаемые на модели, в реальности приводят к экономии топлива, электроэнергии, более рациональному привлечению локомотивов и вагонов. Второй аспект — снижение эксплуатационных расходов. Мониторинг через двойника и профилактика поломок уменьшают затраты на аварийные ремонты и продлевают срок службы активов. По данным РЖД, применение цифровых двойников способно снизить расходы на обслуживание инфраструктуры и техники до 30 % благодаря предотвращению повреждений и повышению эффективности работ [12]. Точный

учет и анализ данных двойника позволяет лучше планировать бюджеты: корректно рассчитывать стоимость эксплуатации объектов и процессов и выявлять избыточные траты. Еще один фактор эффективности — ускорение планирования и принятия решений. Когда у руководства есть наглядная модель и аналитические прогнозы, время на планирование сокращается (по оценкам, на 20 % и более [12]), а решения принимаются обоснованно на основе цифр. Это уменьшает потери от неоптимальных решений. К примеру, цифровой двойник может показать, что определенный перегон скоро станет «бутылочным горлышком», и инвестиции направят именно туда, где это нужнее, избежав ошибочных вложений. Наконец, цифровые двойники улучшают качество обслуживания клиентов — за счет повышения точности расписаний, прозрачности статуса перевозки груза, быстрого реагирования на запросы. Это косвенно повышает экономическую эффективность за счет роста грузо- и пассажиропотока на железной дороге. Цифровые двойники выполняют функцию интеллектуального помощника менеджмента: обеспечивают принятие обоснованных решений в оптимальные сроки при минимальных издержках.

Заключение

Цифровые двойники инфраструктуры стали центральным элементом интеллектуальных транспортных систем в железнодорожной отрасли, обеспечивая новую глубину понимания и контроля над сложнейшим хозяйством железных дорог. За последнее десятилетие в ЕС, Китае и России накоплен значительный опыт, показывающий практическую ценность этой технологии. Благодаря цифровым двойникам железные дороги повышают безопасность (за счет проактивного предотвращения аварий и улучшения подготовки персонала), улучшают надежность работы (минимизируя отказы и увеличивая готовность техники) и повышают эффективность перевозочного процесса (оптимизируя операции и снижая затраты). Впереди дальнейшая интеграция цифровых моделей, совершенствование стандартов и повсеместное распространение этих решений. Можно ожидать,

что уже к началу 2030-х годов цифровой двойник станет таким же привычным и обязательным инструментом управления железной дорогой, как сегодня диспетчерский центр, и без него невозможно будет представить ни строительство новых линий, ни ежедневную эксплуатацию. Интеллектуальные транспортные системы, опирающиеся на цифровые двойники, прокладывают путь к более устойчивой, эффективной и умной железнодорожной сети будущего — в Европе, Азии и по всему миру.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 56829—2015. Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения = Intelligent transport systems. Terms and definitions: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 декабря 2015 г. № 2150-ст: дата введения: 2016-06-01. М.: Стандартинформ, 2016. 13 с.
2. Glaessgen E. H., Stargel D. S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (Honolulu, HI, USA, 23–26 April 2012). American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. 14 p. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
3. Spanevello T. Digital Twins: Accelerating the Digital Transformation in the Rail Sector // Global Railway Review. 2021. 01 July. URL: <http://www.globalrailwayreview.com/article/120887/digital-twins-rail> (дата обращения: 28.09.2025).
4. Rail Strategic Research and Innovation Agenda — December 2020 // European Rail Research Advisory Council. 2020. 01 December. URL: <http://errac.org/publications/rail-strategic-research-and-innovation-agenda-december-2020> (дата обращения: 28.09.2025).
5. Digital Modelling Workshop. 30 June 2021. Webinar Slidepack // International Union of Railways. URL: <http://uic.org/events/digital-modelling-workshop> (дата обращения: 28.09.2025).
6. The Case for a Federated Digital Model of the Rail System / A. Magnien, B. Janssen, G. Dessagne, P. Tane // Global Railway Review. 2022. 20 October. URL: <http://www.globalrailwayreview.com/article/138386/the-case-for-a-federated-digital-model-of-the-rail-system> (дата обращения: 28.09.2025).
7. Crisan O. Italferr’s AI-Powered Digital Twin for Serravalle Tunnel // Bentley’s Blog. 2025. 23 October. URL: <http://blog.bentley.com/software/yii-winner-bridges-and-tunnels-category-italferr-s-p-a> (дата обращения: 25.10.2025).
8. Wang T. The Intelligent Beijing–Zhangjiakou High-Speed Railway // Engineering. 2021. Vol. 7, Iss. 12. Pp. 1665–1672. DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.006.
9. China Mobile and ZTE Achieve Industry’s First Digital Twin-Based Precise Network Planning for High-Speed Rail // ZTE Official Website. 2023. 10 November. URL: <http://www.zte.com.cn/global/about/news/china-mobile-and-zte-achieve-industrys-first-digital-twin-based-precise-network-planning-for-high-speed-rail> (дата обращения: 28.09.2025).
10. Кадик Л. Цифровые двойники на железной дороге. К 2030 году искусственный интеллект будет управлять транспортной инфраструктурой // Гудок.RU. 2021. 21 октября. URL: <http://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1583619/> (дата обращения: 28.09.2025).
11. Ольгейзер И. А. Цифровой двойник сортировочной горки // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 1. С. 20–22. DOI: 10.34649/AT.2020.1.1.003.
12. «Умный локомотив» увеличит производительность депо на 22 % // РЖД Цифровой. 2022. 08 июля. URL: <http://rzdigital.ru/projects/umnyy-lokomotiv-uvlichit-proizvoditelnost-depo-na-22/> (дата обращения: 28.09.2025).
13. Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства: постановление Правительства Российской Федерации от 05 марта 2021 года № 331 (ред. от 20 декабря 2022 года № 2357).

Дата поступления: 21.10.2025

Решение о публикации: 08.11.2025

Development of Intelligent Transport Systems: Digital Twins in the Railway Industry

Denis V. Zuev — PhD in Engineering, General Director. Research interests: neural networks, digital twins.
E-mail: zuevdv@gmail.com

Sintez AT LLC, 28/29, Sredny prospect, Vasilievsky Island, Saint-Petersburg, 199004, Russia

For citation: Zuev D. V. Development of Intelligent Transport Systems: Digital Twins in the Railway Industry. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 33–46. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-33-46. (In Russian)

Abstract. *An overview of the evolution of intelligent transport systems within the railway sector is presented, highlighting the pivotal role of “digital twins” technology for both infrastructure and rolling stock. The relevance of this topic arises from the ongoing global digital transformation within the railway industry, which aims to enhance the safety, reliability and efficiency of the transportation processes. **Purpose:** to conduct a comparative analysis of major projects, technological solutions and approaches to the implementation of digital twins in the European Union, China, and Russia, while also assessing their impact on operational performance. **Methods:** the analysis incorporates initiatives from the European Union, such as Shift2Rail and Europe’s Rail, which emphasize standardization and predictive maintenance; extensive Chinese government programmes such as the Digital Railway Plan set for completion by 2035, recognized for its emphasis on high speed and integrated technologies (such as BIM and 5G-R); and the pragmatic strategies adopted by Russian Railways (ACS BIM, the “Smart Locomotive”, and the digital twin of the marshalling yard), all aimed at achieving intelligent asset management by 2030. The findings indicate that all regions are utilizing a common technological foundation, encompassing BIM platforms, IoT/5G networks, AI/ML analytics, and simulation models. **Results:** the results demonstrate that digital twins facilitate early defect detection and predictive preventive maintenance, resulting in fewer accidents, increased reliability, reduced unplanned downtime by up to 30%, and improved economic efficiency, with maintenance costs reduced by up to 30% and operations optimized.*

Keywords: *intelligent transport systems, digital twin, railway infrastructure, BIM modelling, predictive maintenance, artificial intelligence, reliability, efficiency*

REFERENCES

1. GOST R 56829—2015. Intellektualnye transportnye sistemy. Terminy i opredeleniya [GOST R 56829—2015. Intelligent transport systems. Terms and definitions]. Effective from June 01, 2016. Moscow, StandartInform Publishing House, 2016, 13 p. (In Russian)
2. Glaessgen E. H., Stargel D. S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles, *Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, HI, USA, April 23–26, 2012*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012, 14 p. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
3. Spanevello T. Digital Twins: Accelerating the Digital Transformation in the Rail Sector, *Global Railway Review*. Published online at July 01, 2021. Available at: <http://www.globalrailwayreview.com/article/120887/digital-twins-rail> (accessed: September 28, 2025).
4. Rail Strategic Research and Innovation Agenda — December 2020, *European Rail Research Advisory Council*. Published online at December 01, 2020. Available at: <http://errac.org/publications/rail-strategic-research-and-innovation-agenda-december-2020> (accessed: September 28, 2025).
5. Digital Modelling Workshop. 30 June 2021. Webinar Slidepack, *International Union of Railways*. Available at: <http://uic.org/events/digital-modelling-workshop> (accessed: September 28, 2025).

6. Magnien A., Janssen B., Dessagne G., Tane P. The Case for a Federated Digital Model of the Rail System, *Global Railway Review*. Published online at October 20, 2022. Available at: <http://www.globalrailwayreview.com/article/138386/the-case-for-a-federated-digital-model-of-the-rail-system> (accessed: September 28, 2025).
7. Crisan O. Italferr's AI-Powered Digital Twin for Serravalle Tunnel, *Bentley's Blog*. Published online at October 23, 2025. Available at: <http://blog.bentley.com/software/yii-winner-bridges-and-tunnels-category-italferr-s-p-a> (accessed: October 25, 2025).
8. Wang T. The Intelligent Beijing–Zhangjiakou High-Speed Railway, *Engineering*, 2021, Vol. 7, Iss. 12, Pp. 1665–1672. DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.006.
9. China Mobile and ZTE Achieve Industry's First Digital Twin-Based Precise Network Planning for High-Speed Rail, *ZTE Official Website*. Published online at November 10, 2023. Available at: <http://www.zte.com.cn/global/about/news/china-mobile-and-zte-achieve-industrys-first-digital-twin-based-precise-network-planning-for-high-speed-rail> (accessed: September 28, 2025).
10. Kadik L. Tsifrovye dvoyniki na zheleznoy doroge. K 2030 godu iskusstvennyy intellekt budet upravlyat transportnoy infrastrukturoy [Digital Twins on the Railway. By 2030, Artificial Intelligence Will Manage Transport Infrastructure], *Gudok.RU*. Published online at October 21, 2021. Available at: <http://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1583619/> (accessed: September 28, 2025). (In Russian)
11. Olgezyer I. A. Tsifrovoy dvoynik sortirovochnoy gorki [Digital Twin Sorting Yard], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2020, No. 1, Pp. 20–22. DOI: 10.34649/AT.2020.1.1.003. (In Russian)
12. “Umnyy lokomotiv” uvelichit proizvoditelnost depo na 22 % [“Smart Locomotive” to Increase Depot Productivity by 22 %], *RZhD Tsifrovoy [RZD.Digital]*. Published online at July 08, 2022. Available at: <http://rzdigital.ru/projects/umnyy-lokomotiv-uvelichit-proizvoditelnost-depo-na-22/> (accessed: September 28, 2025). (In Russian)
13. Ob ustanovlenii sluchaev, pri kotorykh zastroyshchikom, tekhnicheskim zakazchikom, litsom, obespechivayushchim ili osushchestvlyayushchim podgotovku obosnovaniya investitsiy, i (ili) litsom, otvetstvennym za ekspluatatsiyu obekta kapitalnogo stroitelstva, obespechivayutsya formirovanie i vedenie informatsionnoy modeli obekta kapitalnogo stroitelstva [On establishing cases in which the developer, technical customer, person ensuring or carrying out the preparation of investment justification, and (or) the person responsible for the operation of a capital construction project ensure the formation and maintenance of an information model of the capital construction project]: Decree of the Government of the Russian Federation No. 331 dated March 05, 2021 (as amended on December 20, 2022 No. 2357). (In Russian)

Received: 21.10.2025

Accepted: 08.11.2025

УДК 004.052.42

Формальная верификация программного обеспечения с помощью больших языковых моделей

Мельников Павел Андреевич — магистр, аспирант кафедры «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: надежность программного обеспечения, искусственный интеллект, верификация программного обеспечения. E-mail: gleavero@gmail.com

Тюгашев Андрей Александрович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: искусственный интеллект, разработка программного обеспечения, надежность программного обеспечения. E-mail: tau797@mail.ru

Институт автоматизации и информационных технологий, Самарский государственный технический университет, Россия, 443100, Самарская обл., г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244

Для цитирования: Мельников П. А., Тюгашев А. А. Формальная верификация программного обеспечения с помощью больших языковых моделей // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 47–53. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-47-53

Аннотация. Представлено исследование о варианте применения больших языковых моделей для верификации программного обеспечения. **Цель:** создание системы для автоматической верификации программного обеспечения заданным требованиям. Для достижения цели использованы информационные технологии, формальная верификация, искусственный интеллект и другие инновационные подходы. **Методы:** анализ современных инструментов и технологий для верификации ПО, включая существующие инструменты. **Результаты:** показывают сильные и слабые стороны применения больших языковых моделей для верификации ПО. **Практическая значимость:** заключается в повышении качества и надежности ПО. Исследование имеет важное значение для развития технологий железнодорожного транспорта и повышения надежности работы информационных систем. **Обсуждение:** высказываются рекомендации по дальнейшему совершенствованию предложенной системы верификации, освещаются вопросы, требующие дальнейших исследований и разработок.

Ключевые слова: большие языковые модели, формальная верификация, автоматизация спецификаций, Java Modeling Language, искусственный интеллект

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки); **2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

Введение

Формальные языки спецификации, такие как Java Modeling Language (JML) [1], стали незаменимыми для спецификации и верификации поведения Java-программ. Эти инструменты позволяют разработчикам модульно определять предварительные условия, последующие условия, инварианты и условия кадра, что обычно называется проектированием по контракту. В настоящее время используются дедуктивная верификация (с ис-

пользованием доказательства теорем и символического выполнения), ограниченная проверка моделей (на основе теорий выполнимости формул) и новые гибридные методы, включающие машинное обучение для автоматизации генерации спецификаций.

Однако ручное создание аннотаций JML является сложным, трудоемким и подверженным ошибкам процессом. Появление мощных LLM (англ. *Large Language Model* — большая языко-

вая модель, БЯМ) открыло новые возможности для автоматизации генерации спецификаций JML. Интеграция БЯМ с формальными методами может снизить трудоемкость ручной работы и повысить надежность программного обеспечения. Тем не менее остаются следующие проблемы:

- зависимость от контекста — БЯМ могут упустить из виду семантику кода, например побочные эффекты методов;
- синтаксические ошибки — БЯМ могут генерировать код, несовместимый с JML. Модели генерации кода требуют дополнительной настройки, поскольку для точной генерации аннотаций необходимы более объемные обучающие наборы данных;
- семантическая несогласованность — автоматически сгенерированные контракты могут противоречить предполагаемой логике приложения.

Эти проблемы подрывают доверие к автоматизированным решениям и ограничивают их применимость на практике. В результате изучение возможностей интеграции БЯМ с символьной верификацией будет иметь большое значение для снижения рабочей нагрузки при верификации программного обеспечения и повышения качества получаемого программного обеспечения.

Соответственно, цель исследования заключается в изучении точности генерации аннотаций JML с использованием «небольших» языковых моделей (до 10 млрд параметров) и оценке возможности их использования без дополнительной тонкой настройки на примерах кода с существующими аннотациями JML.

Для достижения цели были сформулированы следующие задачи:

- подготовить тестовые примеры для генерации аннотаций JML;
- сгенерировать аннотации и проверить их;
- собрать статистику выполнения и проанализировать качество аннотаций.

Существующие подходы к генерации JML-спецификаций

Традиционно использовались шаблонные методы (например, Houdini) и инструменты вывода инвариантов на основе тестов (например, Daikon).

Они эффективно работают для простых спецификаций, но плохо описывают сложную семантику крупных Java-программ.

Новейшие LLM-методики, например SpecGen, используют большие модели для понимания контекста кода и генерации JML-спецификаций. Обычно применяется небольшое количество примеров, и затем спецификации уточняются по результатам проверки; используются мутации и эвристики отбора [2, 3].

Гибридные подходы интегрируют статический анализ и NLP-методы для автоматического извлечения предикатов и обогащения спецификаций (например, проект DECODER): статический анализ дает надежные предикаты, NLP — предикаты из документации [4].

Дедуктивная верификация переводит аннотированные Java-программы в логические формулы; доказательство корректности формул доказывает корректность кода. Инструмент KeY — пример среды для интерактивного доказательства с использованием Java Dynamic Logic [5, 6].

Метод BMC (Bounded Model Checking) исследует пространство состояний до заданного предела, разворачивая циклы и рекурсию фиксированное число раз и проверяя свойства SMT-решателями. Плюс — высокая автоматизация и быстрые контрпримеры, минус — неполнота за пределами границы проверки [7, 8].

LLM применяются для автоматизации создания формальных спецификаций. Мутирование и эвристики отбора в сочетании с верификацией дают улучшенные результаты [9].

Совмещение выводов статического анализа и результатов NLP позволяет получать обогащенные JML-спецификации, итеративная доработка с участием человека повышает качество [4].

Один из новейших подходов улучшает генерацию спецификаций за счет использования операторов мутации для создания разнообразных вариантов — кандидатов. Каждый вариант проверяется, и эвристическая система выбирает тот, который с наибольшей вероятностью является правильным. Такое взаимодействие между БЯМ и формальной верификацией значительно превос-

ходит традиционные статические и основанные на тестах методы, обеспечивая более высокие показатели успешности при валидации [9].

Предлагаемый метод

Предлагаемый метод автоматизации генерации и верификации спецификаций JML состоит из четырех последовательных этапов.

На первом этапе генерируются аннотации. Входным материалом является исходный код классов Java с комментариями на естественном языке. На этом этапе используются локально развернутые модели с открытыми весами: Qwen2.5-coder, CodeLlama и Deepseek-coder-v2 [10, 11].

Сравнение основных параметров моделей приведено в табл. 1. Особое внимание уделяется параметрам (температура 0,7, длина контекста — 4096 токенов), которые позволяют достичь баланса между креативностью и точностью.

На втором этапе проводится синтаксическая проверка. Сгенерированные аннотации проверяются на наличие синтаксических ошибок, типграфических несоответствий и конфликтов контрактов с помощью инструмента SpotBugs (версия 4.8.3) [12]. Журналы ошибок записываются для последующего исправления.

На третьем этапе — формальной верификации — спецификации должны быть формально проверены в среде OpenJML [13] (версия 21-0.8) с использованием символьного выполнения и SMT (Satisfiability Modulo Theories)-решателей (логических решателей с поддержкой теорий) (Z3). Неудачные верификации анализируются на предмет таких причин, как недостаточная детализация контракта или семантические несоответствия.

Четвертый этап — классификация и исправление ошибок. Синтаксические ошибки будут автоматически удалены скриптами, а семантические ошибки требуют ручного вмешательства. Результаты записываются в матрицу ошибок, которая служит основой для дальнейшего переобучения моделей.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на 11 классах Java из примеров кода на веб-сайте OpenJML [14].

Средний размер класса составлял 50–100 строк кода, а функциональность включала методы с циклами, условиями и обработкой исключений. Потенциальным ограничением исследования является относительно небольшой размер выборки, что исключает возможность экстраполяции результатов на более крупные проекты. Для повышения надежности результатов предлагается расширить набор тестовых случаев в последующих работах.

Исследовательская инфраструктура включала MacBook Pro M1 с 16 ГБ унифицированной памяти, который использовался для развертывания LLM и выполнения формальных процедур верификации.

Для оценки производительности использовались следующие метрики:

- точность генерации — доля аннотаций, прошедших синтаксическую верификацию;
- правильность исходного кода — процент скомпилированных классов, прошедших верификацию SpotBugs;
- время обработки класса.

Исходный код экспериментальной установки доступен в репозитории проекта по ссылке http://github.com/Gleavero/verification_system.

Заключение

Основной вклад проведенного исследования заключается в разработке современной инфраструктуры верификации, которая объединяет большие языковые модели с утилитами формальной верификации, такими как SpotBugs и OpenJML. Эта экосистема облегчает оптимизированное создание и подтверждение спецификаций JML.

Предварительные экспериментальные результаты (табл. 2) показывают, что модели умеренного размера, характеризующиеся количеством параметров, не превышающим 7 млрд, демонстрируют способность генерировать синтаксически правильные аннотации.

Однако эффективность этих моделей снижается из-за смешанных переменных, в частности контекстных зависимостей и недостаточно богатого набора данных, используемого на этапе обучения. По различным тестам средняя точность генерации

Таблица 1

Сравнение БЯМ, использованных в работе

	CodeLlama 7B	Qwen-Coder 1.5 (7B)	DeepSeek Coder 6B
HumanEval (Pass@1), %	34,8	41,3	72
Размер контекста, токенов	16 тыс.	8 тыс.	16 тыс.
Размер модели, параметров	7 млрд	7 млрд	6 млрд
Использование памяти, ГБ	14	14	12
Лицензия	Особая (Meta)	Apache 2.0	MIT

Таблица 2

Результаты верификации

Метрика	CodeLlama 7B	Qwen-Coder 1.5 (7B)	DeepSeek Coder 6B
Успешно скомпилировано, %	25,00	58,33	25,00
Прошло через SpotBugs, %	8,33	8,33	8,33
Прошло через OpenJML, %	8,33	8,33	8,33
Среднее время верификации одного класса, с	87,25	34,76	71,12

спецификаций JML составила примерно 8,33 %, хотя были и явные лидеры: Qwen-Coder 1.5 продемонстрировал максимальную производительность на уровне 58 %, а CodeLlama 7B показал промежуточные результаты на уровне 25 %. Анализ протестированных конфигураций выявил несколько общих недостатков. К ним относятся неточности в определении предварительных условий для методов, вызывающих побочные эффекты, и систематическое игнорирование инвариантов на уровне классов (8 %).

По результатам экспериментов предлагаемая методология достигает точности верификации 8,3 %, что ниже стандартов, установленных конкурента-

ми, участвовавшими в конкурсе SV-COMP [15]. Для более высокой точности генерации спецификаций рекомендуется использовать модели, оснащенные расширенными контекстными окнами (минимальная емкость — 16 000 токенов) наряду с архитектурными масштабами, превышающими 10 млрд параметров, типичными для GPT-4 или адаптированных версий CodeLlama. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что использование алгоритмов машинного обучения с синтетическими наборами данных, аннотированными на языке JML, существенно повышает семантическую когерентность получаемых спецификаций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Leavens G. T., Cheon Y. Design by Contract with JML. 2006. 13 p. URL: http://www.academia.edu/26405390/Design_by_Contract_with_JML (дата обращения: 07.11.2025).
2. SpecGen: Automated Generation of Formal Program Specifications via Large Language Models / L. Ma, S. Liu, Y. Li // Proceedings of the 47th International Conference on Software Engineering (ICSE 2025) (Ottawa, Canada, 26 April — 06 May 2025). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025. Pp. 16–28. DOI: 10.1109/ICSE55347.2025.00129.
3. Can Large Language Models Transform Natural Language Intent into Formal Method Postconditions? / M. Endres, S. Fakhoury, S. Chakraborty, S. K. Lahiri // Proceedings of the ACM on Software Engineering. 2024. Vol. 1, Iss. FSE. Art. No. 84. Pp. 1889–1912. DOI: 10.1145/366079.
4. Puccetti A., de Chalendar G., Gibello P.-Y. Combining Formal and Machine Learning Techniques for the Generation of JML Specifications // Proceedings of the 23rd ACM International Workshop on Formal Techniques for Java-like Programs (FTfJP '21) (online, 13 July 2021). New York: Association for Computing Machinery. 2021. Pp. 59–64. DOI: 10.1145/3464971.3468425.
5. The Java Verification Tool KeY: A Tutorial / B. Beckert, R. Bubel, D. Drodt [et al.] // Formal Methods (FM 2024): Proceedings of the 26th International Symposium (Milan, Italy, 09–13 September 2024). Part 2. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 14934 / A. Platzer [et al.] (eds). Cham: Springer, 2025. Pp. 597–623. DOI: 10.1007/978-3-031-71177-0_32.

6. Hähnle R., Huisman M. Deductive Software Verification: From Pen-and-Paper Proofs to Industrial Tools // *Computing and Software Science: State of the Art and Perspectives. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10000 / B. Steffen, G. Woeginger (eds). Cham: Springer, 2019. Pp. 345–373. DOI: 10.1007/978-3-319-91908-9_18.*
7. Modular Verification of JML Contracts Using Bounded Model Checking / B. Beckert, M. Kirsten, J. Klamroth, M. Ulbrich // *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation: Verification Principles (ISoLA 2020): Proceedings of the 9th International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods (Rhodes, Greece, 20–30 October 2020). Part 1. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12476 / T. Margaria, B. Steffen (eds). Cham: Springer, 2020. Pp. 60–80. DOI: 10.1007/978-3-030-61362-4_4.*
8. Liu T. Efficient Verification of Programs with Complex Data Structures Using SMT Solvers: A Thesis for the Degree of Doctor of Natural Science. Karlsruhe Institute of Technology, 2018. 173 p. DOI: 10.5445/IR/1000084545.
9. SpecEval: Evaluating Code Comprehension in Large Language Models via Program Specifications / L. Ma, S. Liu, L. Bu [et al.] // *ArXiv. 2025. Vol. 2409.12866. 12 p. DOI: 10.48550/arXiv.2409.12866.*
10. Code Llama: Open Foundation Models for Code / B. Rozière, J. Gehring, F. Gloeckle [et al.] // *ArXiv. 2024. Vol. 2308.12950. 48 p. DOI: 10.48550/arXiv.2308.12950.*
11. Qwen Technical Report / J. Bai, S. Bai, Y. Chu [et al.] // *ArXiv. 2023. Vol. 2309.16609. 59 p. DOI: 10.48550/arXiv.2309.16609.*
12. SpotBugs Manual — SpotBugs 4.9.8 Documentation. URL: <http://spotbugs.readthedocs.io/en/latest/index.html> (дата обращения: 07.11.2025).
13. About OpenJML. URL: <http://www.openjml.org/about> (дата обращения: 07.11.2025).
14. OpenJML Examples. URL: <http://www.openjml.org/examples> (дата обращения: 07.11.2025).
15. Beyer D., Strejček J. Improvements in Software Verification and Witness Validation: SV-COMP // *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS 2025): Proceedings of the 31st International Conference (Hamilton, Canada, 03–08 May 2025). Part 3. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 15698 / A. Gurfinkel, M. Heule (eds). Cham: Springer, 2025. Pp. 151–186. DOI: 10.1007/978-3-031-90660-2_9.*

Дата поступления: 15.11.2025

Решение о публикации: 18.11.2025

Formal Verification of Software Using Large Language Models

Pavel A. Melnikov — Master of Engineering, Postgraduate Student of the “Computer Science and Computer Engineering” Department. Research interests: software reliability, artificial intelligence, software verification. E-mail: gleavero@gmail.com

Andrey A. Tyugashev — Dr. Sci. in Engineering, Assistant Professor, Professor of the “Computer Science and Computer Engineering” Department. Research interests: artificial intelligence, software development, software reliability. E-mail: tau797@mail.ru

Automation and Information Technology Institute, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia

For citation: Melnikov P. A., Tyugashev A. A. Formal Verification of Software Using Large Language Models. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 47–53. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-47-53. (In Russian)

Abstract. *This study presents an exploration of the application of large language models for software verification. **Purpose:** to create a system for the automatic verification of software for specified requirements. Information technologies, formal verification, artificial intelligence, and other innovative approaches have been used to achieve this goal. **Methods:** analysis of current tools and technologies for software verification, including existing instruments. **Results:** the research highlights the strengths and weaknesses associated with the use of large language models for software verification. **Practical significance:** enhancing the quality and reliability of software is crucial. This research is important for advancing railway transportation technologies and increasing the reliability of information systems. **Discussion:** recommendations have been formulated for further improvement of the proposed verification system. Additionally, the issues requiring further research and development have been highlighted.*

Keywords: *large language models, formal verification, specification automation, Java Modeling Language, artificial intelligence*

REFERENCES

1. Leavens G. T., Cheon Y. Design by Contract with JML. 2006. 13 p. Available at: http://www.academia.edu/26405390/Design_by_Contract_with_JML (accessed: November 07, 2025).
2. Ma L., Liu S., Li Y. SpecGen: Automated Generation of Formal Program Specifications via Large Language Models, *Proceedings of the 47th International Conference on Software Engineering (ICSE 2025), Ottawa, Canada, April 26 — May 06, 2025*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025, Pp. 16–28. DOI: 10.1109/ICSE55347.2025.00129.
3. Endres M., Fakhoury S., Chakraborty S., Lahiri S. K. Can Large Language Models Transform Natural Language Intent into Formal Method Postconditions? *Proceedings of the ACM on Software Engineering*, 2024, Vol. 1, Iss. FSE, Art. No. 84, Pp. 1889–1912. DOI: 10.1145/366079.
4. Puccetti A., de Chalendar G., Gibello P.-Y. Combining Formal and Machine Learning Techniques for the Generation of JML Specifications, *Proceedings of the 23rd ACM International Workshop on Formal Techniques for Java-like Programs (FTJJP '21), Online, July 13, 2021*. New York, Association for Computing Machinery, 2021, Pp. 59–64. DOI: 10.1145/3464971.3468425.
5. Beckert B., Bubel R., Drodts D., et al. The Java Verification Tool KeY: A Tutorial. In: *Platzer A., et al. (eds) Formal Methods (FM 2024): Proceedings of the 26th International Symposium, Milan, Italy, September 09–13, 2024. Part 2*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 14934. Cham, Springer, 2025, Pp. 597–623. DOI: 10.1007/978-3-031-71177-0_32.

6. Hähnle R., Huisman M. Deductive Software Verification: From Pen-and-Paper Proofs to Industrial Tools. In: *Steffen B., Woeginger G. (eds) Computing and Software Science: State of the Art and Perspectives*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10000. Cham, Springer, 2019, Pp. 345–373. DOI: 10.1007/978-3-319-91908-9_18.
7. Beckert B., Kirsten M., Klamroth J., Ulbrich M. Modular Verification of JML Contracts Using Bounded Model Checking, In: *Margarita T., Steffen B. (eds) Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation: Verification Principles (ISoLA 2020): Proceedings of the 9th International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods, Rhodes, Greece, October 20–30, 2020. Part 1*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12476. Cham, Springer, 2020, Pp. 60–80. DOI: 10.1007/978-3-030-61362-4_4.
8. Liu T. Efficient Verification of Programs with Complex Data Structures Using SMT Solvers: A Thesis for the Degree of Doctor of Natural Science. Karlsruhe Institute of Technology, 2018, 173 p. DOI: 10.5445/IR/1000084545.
9. Ma L., Liu S., Bu L., et al. SpecEval: Evaluating Code Comprehension in Large Language Models via Program Specifications, *ArXiv*, 2025, Vol. 2409.12866, 12 p. DOI: 10.48550/arXiv.2409.12866.
10. Rozière B., Gehring J., Gloeckle F., et al. Code Llama: Open Foundation Models for Code, *ArXiv*, 2024, Vol. 2308.12950, 48 p. DOI: 10.48550/arXiv.2308.12950.
11. Bai J., Bai S., Chu Y., et al. Qwen Technical Report, *ArXiv*, 2023, Vol. 2309.16609, 59 p. DOI: 10.48550/arXiv.2309.16609.
12. SpotBugs Manual — SpotBugs 4.9.8 Documentation. Available at: <http://spotbugs.readthedocs.io/en/latest/index.html> (accessed: November 07, 2025).
13. About OpenJML. Available at: <http://www.openjml.org/about> (accessed: November 07, 2025).
14. OpenJML Examples. Available at: <http://www.openjml.org/examples> (accessed: November 07, 2025).
15. Beyer D., Strejček J. Improvements in Software Verification and Witness Validation: SV-COMP. In: *Gurfinkel A., Heule M. (eds) Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS 2025): Proceedings of the 31st International Conference, Hamilton, Canada, May 03–08, 2025. Part 3*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 15698. Cham, Springer, 2025, Pp. 151–186. DOI: 10.1007/978-3-031-90660-2_9.

Received: 15.11.2025

Accepted: 18.11.2025

УДК 004.891

Исследование чувствительности метода анализа иерархий Т. Саати

Бригаднов Игорь Альбертович¹ — д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: теория принятия решений, математическое моделирование, численный анализ. E-mail: brigadnov@mail.ru

Казимиров Самуил Павлович² — магистрант 1-го курса направления 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: математическое моделирование, программирование, численный анализ. E-mail: samuil.kazimirov@gmail.com

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

Для цитирования: Бригаднов И. А., Казимиров С. П. Исследование чувствительности метода анализа иерархий Т. Саати // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 54–62. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-54-62

Аннотация. Средствами *MATLAB* исследуется чувствительность четырех приближенных оценок Саати для вектора приоритетов в методе анализа иерархий. Идея метода заключается в иерархическом представлении проблемы с последующим парным сравнением объектов и вычислением вектора их приоритетов на каждом уровне иерархии. Ошибки экспертов при парном сравнении объектов моделируются добавлением случайных величин к элементам согласованной матрицы Саати. **Цель:** исследование чувствительности метода анализа иерархий путем вычисления коэффициентов линейной свертки четырех оценок Саати для вектора приоритетов. Линейная комбинация этих оценок приравнивается к точному вектору приоритетов, и решается серия СЛАУ размерности $n \times 4$ ($n = \overline{3,11}$) для весовых коэффициентов методом псевдообратной матрицы с регуляризацией Тихонова. **Результаты:** статистически установлено, что первые две оценки Саати для вектора приоритетов несут незначительный вклад, поскольку их весовые коэффициенты практически равны нулю, в то время как весовые коэффициенты третьей и четвертой оценок стабильны и отличны от нуля. **Практическая значимость:** заключается в использовании полученных результатов в оригинальном программном продукте для оценки альтернатив при принятии решений без привлечения коммерческой среды инженерных расчетов *MATLAB*.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, положительная обратная симметричная матрица, оценки Саати для вектора приоритетов, возмущение матрицы парных сравнений, линейная свертка оценок, псевдообратная матрица, регуляризация Тихонова

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); 1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

В последние годы наблюдается устойчивый тренд на развитие искусственного интеллекта, включая рекомендательные системы и смежные технологии, которые обеспечивают высокое качество принятия решений. Теория принятия решений (ТПР) зародилась в трудах античных философов [1, 2]. Практическую рациональность анализировал еще Аристотель, методы выбора в условиях неопределенности разрабатывали стоики. Но основу ТПР как научной дисциплины заложили Бернулли и Лаплас, разработав теорию вероятностей и концепцию ожидаемой полезности.

Прорыв в ТПР произошел после формализации теории игр и аксиоматизации рационального выбора в 1944 году фон Нейманом и Моргенштерном. Позже развился статистический подход к принятию решений, а также были разработаны критерии выбора в условиях неопределенности. Впоследствии были разработаны динамическое программирование, теория полезности и методы анализа решений. В 1960-е годы ТПР получила активное применение в военном деле, экономике, управлении и транспортной логистике.

Однако к 1970-м годам стало очевидно, что рациональные модели не соответствуют реальному поведению людей. Работы по когнитивным искажениям и теории перспектив дали начало поведенческому направлению, изучающему реальные процессы принятия решений людьми. Появились такие математические методы, как стохастическая оптимизация, нечеткая логика и т. д. [1–3].

В 1970-х годах Томас Саати предложил метод анализа иерархий (МАИ), реализующий систем-

ный подход к принятию решений в условиях многокритериального выбора. Основополагающий принцип метода заключается в представлении проблемы в виде иерархической структуры, на вершине которой находится цель принятия решения, ниже — критерии, а в основании — альтернативные варианты решения проблемы (рис. 1) [4]. В общем случае число уровней иерархии не ограничено. Такой подход позволяет решать весьма сложные задачи, разбивая их на простые элементы и выделяя логические связи между ними.

После иерархического представления проблемы находятся приоритеты критериев и частные приоритеты альтернатив по каждому критерию в отдельности. Например, если найден вектор приоритетов критериев $X = \{X_i\}$ ($i = \overline{1,4}$) и по каждому i -му критерию определены частные векторы приоритетов альтернатив $Y^{(i)} = \{Y_k^{(i)}\}$ ($k = \overline{1,3}$) (рис. 1), тогда глобальные приоритеты альтернатив находятся по

формуле свертки $Z_k = \sum_{i=1}^4 Y_k^{(i)} X_i$. На основании этих

значений строится *диаграмма предпочтений* альтернатив, например вида $A_2 \succ A_3 \succ A_1$, откуда следует, что Альтернатива 2 является наиболее подходящей для достижения цели.

Основой МАИ является *экспертное* построение матрицы парных сравнений объектов на каждом уровне иерархии проблемы с дальнейшей оценкой вектора их приоритетов. Т. Саати предложил помимо математически точного вычисления вектора приоритетов четыре его приближенные алгебраические оценки. В статье исследуется чувстви-

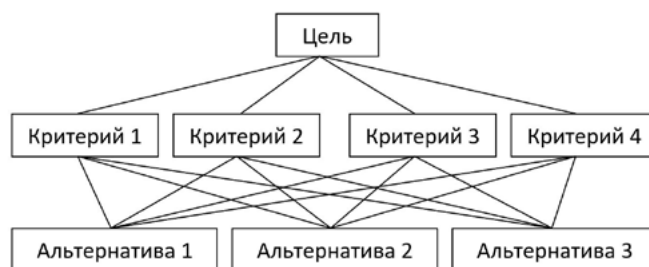


Рис. 1. Трехуровневая иерархическая структура проблемы с четырьмя критериями и тремя альтернативами

тельность этих оценок методами статистического анализа, поскольку ошибки экспертов при парных сравнениях объектов на разных уровнях иерархии моделируются добавлением случайных величин к элементам согласованной матрицы Саати.

Обратно симметричные матрицы парных сравнений

Ключевым этапом метода анализа иерархий Саати является процесс парного сравнения объектов (например, критериев или альтернатив) по оригинальной шкале их относительной важности: 1 — оба одинаково важны, 3 — умеренное превосходство одного над другим, 5 — существенное превосходство одного над другим, 7 — значительное превосходство одного над другим, 9 — абсолютное превосходство одного над другим и 2, 4, 6, 8 — промежуточные значения [4–7].

На основе парных сравнений формируется положительная обратно симметричная матрица с рациональными элементами, которые подчиняются правилу: $a_{ji} = 1/a_{ij}$ для $i, j = \overline{1, n}$, где n — число объектов на данном уровне иерархии.

При непротиворечивых экспертных оценках матрица парных сравнений получается *согласованной*, а именно: если $\omega = \{\omega_i\} (i = \overline{1, n})$ — вектор точных измерений, тогда матрица Саати имеет вид [4]:

$$A = \left\{ a_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j} \right\}, (i, j = \overline{1, n}).$$

Для случая $n = 2$ матрица парных сравнений всегда согласованная. В общем случае такое требование невыполнимо потому, что измерения физических величин не являются математически точными, а тем более человеческие суждения о соотношении объектов различной природы.

Оценкой качества парных сравнений объектов в матрице Саати служит *индекс согласованности*, который вычисляется по формуле:

$$ИС_n = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

где λ_{\max} — наибольшее (главное) собственное число матрицы.

Далее ищется *нормализованный* к единице главный собственный вектор, отвечающий главному собственному числу, поскольку именно он является вектором приоритетов (относительных весов) объектов на данном уровне иерархии. Напомним, что нормализация вектора к единице состоит в делении каждого его элемента на сумму всех элементов, в результате сумма элементов нормализованного вектора равна единице. Легко убедиться, что для согласованной матрицы Саати справедливо соотношение

$$A\omega = n\omega,$$

которое является определением собственного числа и собственного вектора квадратной матрицы. Поэтому для согласованной матрицы $\lambda_{\max} = n$ и $ИС_n = 0$. Остальные собственные числа равны нулю. Отметим, что для несогласованной матрицы Саати всегда $\lambda_{\max} > n$.

В Национальной лаборатории Окриджа, а затем в школе Уортона были сгенерированы средние *случайные индексы* (СИ_n) для случайных матриц Саати размерности от 3 до 15 (табл. 1). Мы будем исследовать матрицы размерности от 3 до 11 как наиболее рекомендуемые для практического применения [4–7].

После этого вычисляется величина *относительной согласованности* суждений экспертов по формуле:

$$ОС_n = \frac{ИС_n}{СИ_n} 100 \%.$$

Если индекс $ОС_n \leq 10 \%$, тогда полученный результат по оценке приоритетов достоверен [4–7].

Таблица 1

Значения случайных индексов согласованности для матриц Саати

Размерность матрицы n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
СИ _n	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Если индекс $OS_n > 10\%$, тогда участникам исследования необходимо более подробно проанализировать проблему, проверить свои суждения, уточнить статистические данные или провести новые эксперименты.

Для определения диаграммы предпочтений альтернатив путем применения МАИ требуется для каждого уровня иерархии вычислить вектор приоритетов объектов. Для этого Саати предложил четыре его приближенные алгебраические оценки:

1. Суммировать элементы матрицы по строкам и нормализовать полученный вектор-столбец.
2. Суммировать элементы матрицы по столбцам и вычислить обратные значения этих сумм. Нормализовать полученный вектор-строку и транспонировать.
3. Суммировать элементы матрицы по столбцам и разделить элементы каждого столбца на соответствующую сумму. Найти средние арифметические значения всех строк и нормализовать полученный вектор-столбец.
4. Найти средние геометрические значения всех строк и нормализовать полученный вектор-столбец.

Легко убедиться, что для согласованной матрицы Саати все четыре оценки вектора приоритетов совпадают с его точным значением — нормализованным к единице вектором точных значений.

Методика исследования

Ошибки экспертов при парных сравнениях объектов будем моделировать добавлением случайных величин к элементам согласованной матрицы Саати.

Пусть для \tilde{A} — искаженной матрицы парных сравнений, $z^{(1)}, z^{(2)}, z^{(3)}, z^{(4)}$ — оценки Саати для вектора приоритетов, найденные соответствующими четырьмя методами, описанными выше, а z^* — точный вектор приоритетов, то есть нормализованный главный собственный вектор, вычисленный средствами MATLAB.

Рассмотрим линейную комбинацию этих оценок с произвольными коэффициентами α_i ($i = \overline{1,4}$), которые будем искать из условия равенства этой свертки точному вектору приоритетов

$$\alpha_1 z^{(1)} + \alpha_2 z^{(2)} + \alpha_3 z^{(3)} + \alpha_4 z^{(4)} = z^*.$$

В результате для нахождения вектора весовых коэффициентов α необходимо решить СЛАУ размерности $n \times 4$ вида

$$Z\alpha = z^*, \tag{1}$$

где матрица Z составлена из вектор-столбцов оценок Саати для вектора приоритетов. При этом СЛАУ (1) является: для $n = 3$ — недоопределенной, для $n = 4$ — квадратной и для $n > 4$ — переопределенной, поэтому классические методы линейной алгебры неприменимы для ее решения, кроме случая $n = 4$ с невырожденной матрицей [8–10].

Воспользуемся аппаратом псевдообратной матрицы Мура — Пенроуза, то есть будем искать решение в виде

$$\alpha = Z^+ z^*, \tag{2}$$

где Z^+ — псевдообратная матрица к Z размерности $4 \times n$. Она всегда существует, причем единственная [11, 12].

Псевдообратная матрица обобщает понятие обратной матрицы, позволяя найти решение с минимальной евклидовой нормой для любых СЛАУ [8, 10]. В случае, когда классического решения нет, псевдообратная матрица дает наилучшее приближение по методу наименьших квадратов [11, 12]. Она определяется двумя способами:

$$\begin{cases} Z^+ = (Z^T Z)^{-1} Z^T, \\ Z^+ = \lim_{\lambda \rightarrow +0} [(Z^T Z + \lambda E)^{-1} Z^T], \end{cases}$$

где λ — параметр регуляризации Тихонова,

E — единичная матрица 4×4 .

А. Н. Тихонов доказал, что если матрица $Z^T Z$ (4×4) вырожденная, тогда псевдообратная матрица находится предельным переходом по параметру регуляризации [12]. Идея метода заключается в добавлении малого регуляризирующего члена в методе наименьших квадратов для СЛАУ (1). А именно: вместо минимизации невязки $\|Z\alpha - z^*\|^2$ находится минимум скалярной функции векторного аргумента $f(\alpha) = \|Z\alpha - z^*\|^2 + \lambda \|\alpha\|^2$, где $\|\cdot\|$ — евклидова норма в соответствующих пространствах \mathbb{R}^n и \mathbb{R}^4 [11, 12].

Исследование чувствительности оценок Саати для вектора приоритетов проводилось в среде инженерных расчетов MATLAB, идеально подходящей для решения задач в векторно-матричной форме.

Алгоритм нахождения коэффициентов линейной комбинации α_i ($i = \overline{1,4}$) состоит из следующих шагов:

1. Генерация согласованной положительной обратнo симметричной матрицы Саати заданной размерности для случайного вектора ω .

2. Аддитивное наложение шума на сгенерированную матрицу Саати (детали — в замечании ниже).

3. Вычисление главного собственного числа искаженной матрицы Саати средствами MATLAB. Проверка условия допустимости $OC_n \leq 10\%$. Если оно выполняется, тогда продолжаем анализ, иначе возвращаемся к пункту 2.

4. Вычисление точного вектора приоритетов через нахождение и нормализацию главного собственного вектора искаженной матрицы Саати средствами MATLAB.

5. Вычисление четырех оценок Саати для вектора приоритетов.

6. Формирование матрицы Z системы (1) и нахождение псевдообратной к ней средствами MATLAB.

7. Вычисление вектора весовых коэффициентов линейной комбинации α по формуле (2).

8. Повторение шагов 1–7 $N = 10^5$ раз. В результате формируется содержательная статистика для всех четырех искомым коэффициентов $\{\alpha_i^{(k)}\}$, ($i = \overline{1,4}; k = \overline{1,N}$).

9. Вычисление средних арифметических значений для каждого весового коэффициента, что отвечает наилучшему приближению по методу наименьших квадратов для константы [9]:

$$\alpha_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \alpha_i^{(k)}, (i = \overline{1,4}).$$

Замечание. На шаге 2 случайные значения, сгенерированные MATLAB, добавляются только к элементам верхней треугольной части согласованной матрицы Саати, поскольку нижняя треугольная часть получается обратнo симметричным отображением, а диагональ остается единичной. Только в этом случае искаженная матрица \tilde{A} яв-

ляется матрицей парных сравнений Саати. Амплитуда шума выбирается из условия $\delta^{-1} < \mu < \delta$, где δ — число, определяемое пользователем, причем $1 \leq \delta \leq 0,5 \|\tilde{A}\|$ [8, 10].

Результаты вычислительных экспериментов

В процессе работы были исследованы квадратные матрицы Саати размерности $n = \overline{3,11}$, поскольку случай $n = 2$ тривиальный. Результаты исследования представлены в табл. 2 и на рис. 2–5.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что:

1. OC_n матрицы Саати прямо пропорционален величине амплитуды шума.

2. СЛАУ (2) имеет стабильное решение при всех размерах матрицы парных сравнений от 3 до 11, кроме $n = 4$, при котором решение нестабильно.

3. Коэффициенты α_1, α_2 увеличиваются по мере увеличения амплитуды шума, тогда как коэффициенты α_3, α_4 — уменьшаются.

4. Значения всех четырех коэффициентов стабилизируются при увеличении размера матрицы для любой амплитуды шума.

5. Первые две оценки Саати для вектора приоритетов несут существенны, поскольку их весовые коэффициенты практически равны нулю при $n \neq 4$, в то время как весовые коэффициенты третьей и четвертой оценок $\tilde{\alpha}_3 \approx 0,63 \pm 0,02$ и $\tilde{\alpha}_4 \approx 0,37 \mp 0,02$.

Таким образом, для точного вектора приоритетов верна оценка

$$z^* \approx \tilde{z} = \tilde{\alpha}_3 z^{(3)} + \tilde{\alpha}_4 z^{(4)},$$

поэтому оценка для главного собственного числа любой матрицы Саати A находится по формуле

$$\lambda_{\max} \approx \tilde{\lambda}_{\max} = \frac{(A\tilde{z}, \tilde{z})}{(\tilde{z}, \tilde{z})},$$

где $(*,*)$ обозначает скалярное произведение векторов в \mathbb{R}^n .

Заключение

Проведенное в среде MATLAB исследование демонстрирует существенную зависимость метода анализа иерархий Саати от ошибок экспертов при

Результаты экспериментов по оценке коэффициентов α

n		3	4	5	6	7	8	9	10	11
δ	α_i									
1,1	α_1	0,0427	-0,0251	0,0079	0,0063	0,0045	0,0039	0,0038	0,0030	0,0035
	α_2	0,0403	-0,0234	0,0064	0,0038	0,0027	0,0022	0,0020	0,0015	0,0017
	α_3	0,4082	1,0589	0,7049	0,6601	0,6417	0,6357	0,6311	0,6354	0,6401
	α_4	0,5088	-0,0104	0,2808	0,3298	0,3511	0,3582	0,3632	0,3601	0,3548
1,5	α_1	0,1131	1,1744	0,0797	0,0663	0,0578	0,0551	0,0507	0,0470	0,0454
	α_2	0,1018	1,0955	0,0547	0,0389	0,0331	0,0294	0,0251	0,0224	0,0210
	α_3	0,2943	0,1244	0,6485	0,6180	0,6217	0,6180	0,6264	0,6266	0,6296
	α_4	0,4908	-1,3943	0,2172	0,2770	0,2878	0,2980	0,2983	0,3047	0,3047
2	α_1	0,1440	1,5574	0,1660	0,1403	0,1270	0,1192	0,1138	0,1098	0,1047
	α_2	0,1297	0,7754	0,1134	0,0813	0,0662	0,0600	0,0532	0,0510	0,0469
	α_3	0,2617	0,2664	0,5996	0,5956	0,5956	0,6040	0,6118	0,6190	0,6258
	α_4	0,4647	-1,5992	0,1214	0,1835	0,2122	0,2181	0,2227	0,2219	0,2244

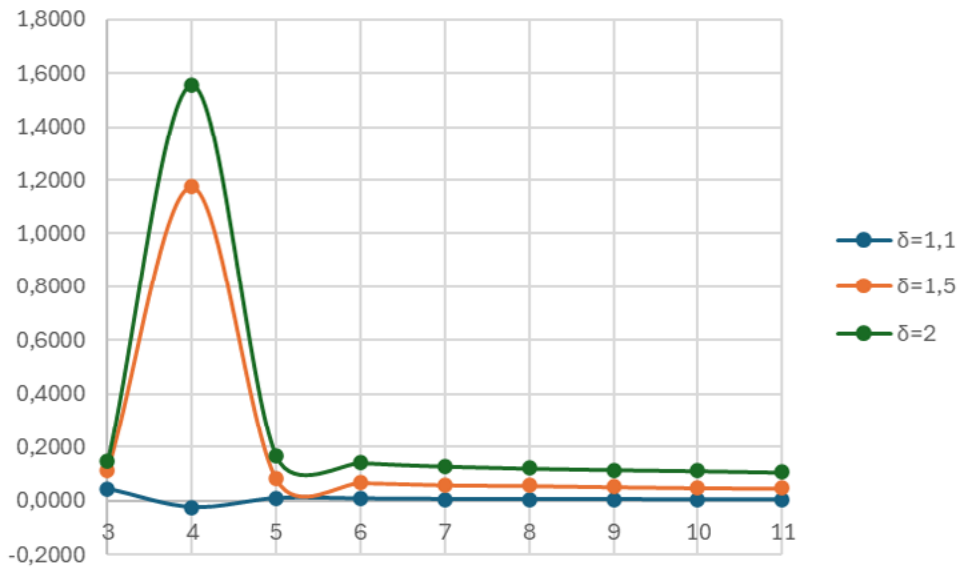


Рис. 2. Значения α_1 при разных коэффициентах шума

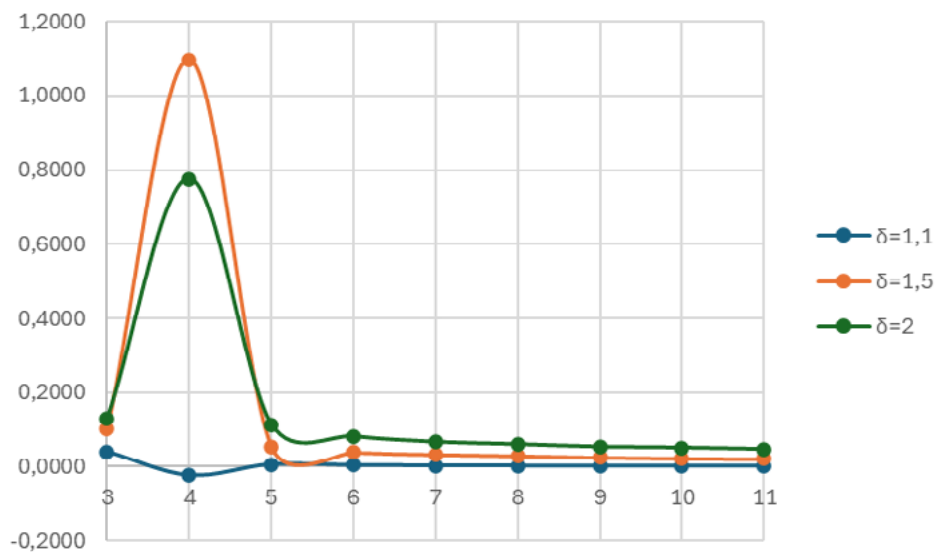


Рис. 3. Значения α_2 при разных коэффициентах шума

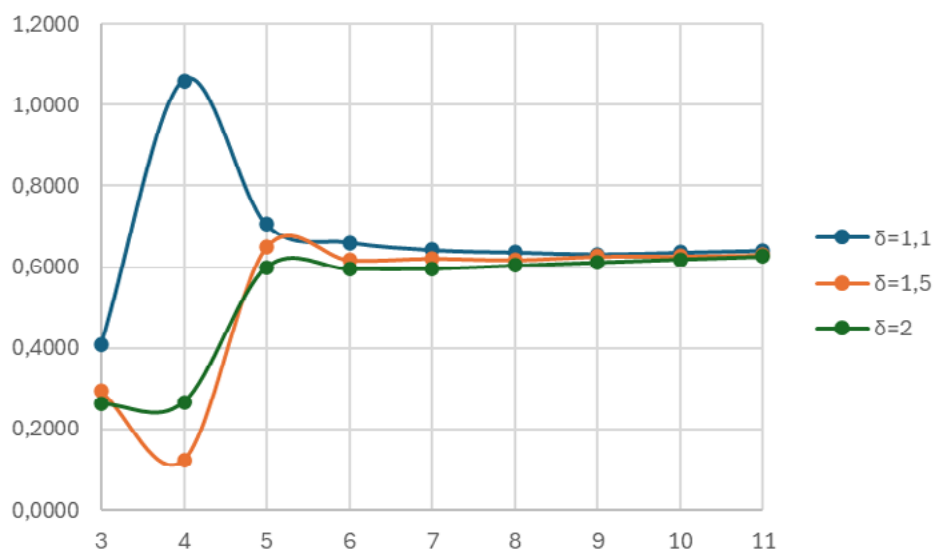


Рис. 4. Значения α_3 при разных коэффициентах шума

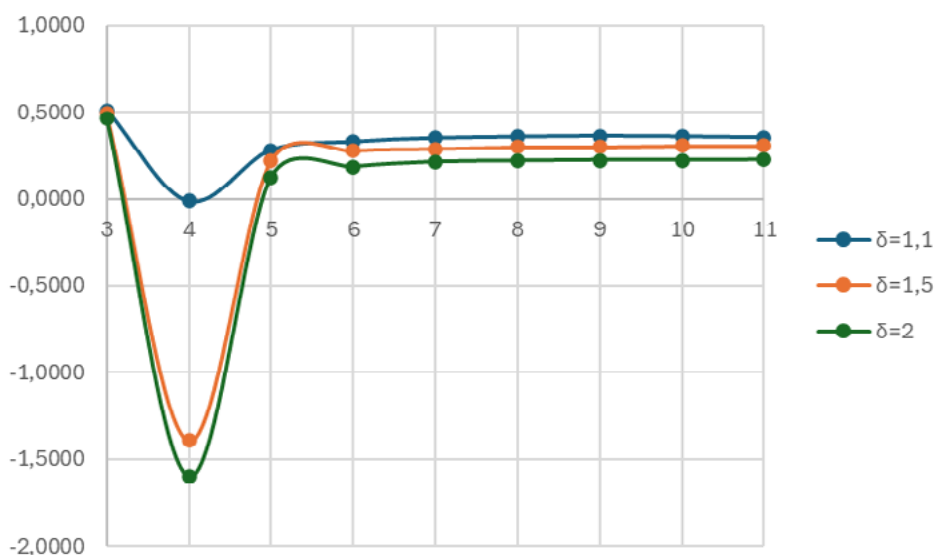


Рис. 5. Значения α_4 при разных коэффициентах шума

формировании матрицы парных сравнений объектов на текущем уровне иерархии проблемы. По предложенной методике в результате численного анализа установлены статистически достоверные закономерности: первые две оценки Саати для вектора приоритетов несущественны, поскольку их весовые коэффициенты практически равны нулю при $n \neq 4$, в то время как весовые коэффициенты тре-

тей и четвертой оценок близки к значениям $0,63 \pm 0,02$ и $0,37 \pm 0,02$ соответственно. Полученные результаты могут быть использованы в оригинальном программном продукте для оценки альтернатив при принятии решений без привлечения коммерческой среды инженерных расчетов MATLAB.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Литвак Б. Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996. 271 с.
2. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах. М.: Логос, 2000. 296 с.

3. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: учебник: в 3 ч. Ч. 2. Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 486 с.
4. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 315 с.
5. Forman E. H., Gass S. I. The Analytic Hierarchy Process — An Exposition // Operations Research. 2001. Vol. 49, Iss. 4. Pp. 469–486. DOI: 10.1287/opre.49.4.469.11231.
6. Bodin L., Gass S. I. On Teaching the Analytic Hierarchy Process // Computers and Operations Research. 2003. Vol. 30, Iss. 10. Pp. 1487–1497. DOI: 10.1016/S0305-0548(02)00188-0.
7. Ishizaka A., Labib A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations // OR Insight. 2009. Vol. 22, Iss. 4. Pp. 201–220. DOI: 10.1057/ori.2009.10.
8. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ / пер. с англ. под ред. Х. Д. Икрамова. М.: Мир, 1989. 655 с.
9. Бригаднов И. А. Методы вычислительной математики. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2001. 83 с.
10. Андрушевский Н. М. Анализ устойчивости решений систем линейных алгебраических уравнений: методическое пособие специального вычислительного практикума. М.: Изд. отдел факультета ВМиК МГУ им. М. В. Ломоносова: МАКС Пресс, 2008. 76 с.
11. Тихонов А. Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения // Доклады Академии наук СССР. 1965. Т. 163, № 3. С. 591–594.
12. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. 2-е изд. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 285 с.

Дата поступления: 01.11.2025

Решение о публикации: 02.11.2025

A Sensitivity Study of T. Saaty's Analytic Hierarchy Process

Igor A. Brigadnov¹

— Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Full Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: decision theory, mathematical modelling, numerical analysis. E-mail: brigadnov@mail.ru

Samuil P. Kazimirov²

— 1st year Master's Degree Student in 09.04.01 Informatics and Computer Engineering. Research interests: mathematical modelling, programming, numerical analysis. E-mail: samuil.kazimirov@gmail.com

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

²Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia

For citation: Brigadnov I. A., Kazimirov S. P. A Sensitivity Study of T. Saaty's Analytic Hierarchy Process. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 54–62. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-54-62. (In Russian)

Abstract. *The sensitivity of four approximate Saaty estimates for a priority vector in the Analytic Hierarchy Process (AHP) was studied using MATLAB tools. This method involves structuring the problem hierarchically, conducting pairwise comparisons of elements, and calculating the priority vector at each level of hierarchy. To model expert errors in these pairwise comparisons, random variables were introduced into the elements of the consistent Saaty matrix. **Purpose:** to study the sensitivity of the AHP by calculating coefficients for the linear convolutions of the four Saaty estimates for the priority vector. A linear combination of these estimates*

was equated to the precise priority vector, and a series of SLAEs $n \times 4$ ($n = \overline{3,11}$) for the weight coefficients is resolved using the pseudoinverse matrix method along with Tikhonov regularization. **Results:** it has been statistically established that the initial two Saaty estimates for the priority vector were insignificant, as their weight coefficients were not substantial and nearly reached zero. In contrast, the weight coefficients of the third and fourth estimates were stable and greater than zero. **Practical significance:** the results obtained can be applied in a proprietary software product for evaluating alternatives in decision-making without involving the MATLAB commercial engineering calculation environment.

Keywords: analytic hierarchy process, positive inverse-symmetric matrix, Saaty estimates for the priority vector, perturbation of the pairwise comparison matrix, linear convolution of estimates, pseudoinverse matrix, Tikhonov regularization

REFERENCES

1. Litvak B. G. Ekspertnye otsenki i prinyatie resheniy [Expert Assessments and Decision Making]. Moscow, Patent Publishing House, 1996, 271 p. (In Russian)
2. Larichev O. I. Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronika sobyтий v Volshebnykh Stranakh [Theory and Methods of Decision Making, as well as a Chronicle of Events in Magic Lands]. Moscow, Logos Publishing House, 2000. 296 p. (In Russian)
3. Orlov A. I. Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie: uchebnik. Ch. 2. Ekspertnye otsenki [Organizational and Economic Modeling: a textbook in 3 parts. Part 2. Expert Assessments]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2011. 486 p. (In Russian)
4. Saaty T. L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision Making. The Analytic Hierarchy Process]. Moscow, Radio i Svyaz Publishing House, 1993, 315 p. (In Russian)
5. Forman E. H., Gass S. I. The Analytic Hierarchy Process — An Exposition, Operations Research, 2001, Vol. 49, Iss. 4, Pp. 469–486. DOI: 10.1287/opre.49.4.469.11231.
6. Bodin L., Gass S. I. On Teaching the Analytic Hierarchy Process, Computers and Operations Research, 2003, Vol. 30, Iss. 10, Pp. 1487–1497. DOI: 10.1016/S0305-0548(02)00188-0.
7. Ishizaka A., Labib A. Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations, OR Insight, 2009, Vol. 22, Iss. 4, Pp. 201–220. DOI: 10.1057/ori.2009.10.
8. Horn R., Johnson C. Matrichnyy analiz [Matrix Analysis]. Moscow, Mir Publishers, 1989, 655 p. (in Russian)
9. Brigadnov I. A. Metody vychislitelnoy matematiki [Methods of Computational Mathematics]. Saint Petersburg, North-Western State Correspondence Technical University, 2001, 83 p. (In Russian)
10. Andrushevskiy N. M. Analiz ustoychivosti resheniy sistem lineynykh algebraicheskikh uravneniy: metodicheskoe posobie spetsialnogo vychislitel'nogo praktikuma [Stability Analysis of Solutions to Systems of Linear Algebraic Equations: A Methodological Handbook for a Special Computational Practical Course]. Moscow, Lomonosov Moscow State University, MAKS Press Publishing House, 2008, 76 p. (In Russian)
11. Tikhonov A. N. O nekorrektnykh zadachakh lineynoy algebrы i ustoychivom metode ikh resheniya [On Incorrect Problems of Linear Algebra and a Stable Method for Their Solution], Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1965, Vol. 163, No. 3, Pp. 591–594. (In Russian)
12. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publishing House, 1979, 285 p. (In Russian)

Received: 01.11.2025

Accepted: 02.11.2025

УДК 004.9+378.1

Концепция построения информационной системы мониторинга и анализа посещаемости студентов на базе веб-технологий

Забродин Андрей Владимирович — канд. ист. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, аналитика данных, проектирование баз данных, веб-разработка, облачные технологии. E-mail: zabrodin@pgups.ru

Тараканова Софья Денисовна — студент бакалавриата 4-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: разработка веб-приложений, информационные системы в образовании. E-mail: tarakanova_sof@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Забродин А. В., Тараканова С. Д. Концепция построения информационной системы мониторинга и анализа посещаемости студентов на базе веб-технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 63–71. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-63-71

Аннотация. Увеличение объемов данных и переход образовательных процессов в цифровую среду требуют разработки надежных и масштабируемых информационных систем для учета и анализа академической активности. **Цель:** разработка концептуальной модели веб-ориентированной информационной системы мониторинга посещаемости студентов, обеспечивающей автоматизацию сбора, обработки и представления данных. **Методы:** применены современные средства платформы Spring Framework, включая использование REST-архитектуры, ORM-технологий (Hibernate, JPA) и репозиторного слоя Spring Data. В качестве базы данных выбрана PostgreSQL, обеспечивающая поддержку распределенной обработки и оптимизации запросов. **Результаты:** предложена концептуальная модель системы, включающая многоуровневую архитектуру, модуль управления пользователями и компонент аналитической обработки данных. Определены подходы к реализации сервисного слоя и взаимодействия с клиентской частью. Проведен анализ производительности, подтвердивший устойчивость системы при увеличении объема данных и числа одновременных пользователей. **Практическая значимость:** заключается в возможности применения предложенной архитектуры для построения современных образовательных платформ, поддерживающих автоматизацию учета, анализа и визуализации учебных показателей студентов. Разработанное решение может быть интегрировано с существующими LMS и использоваться при создании адаптивных цифровых образовательных сервисов.

Ключевые слова: информационная система, веб-технологии, мониторинг посещаемости, анализ данных, цифровизация образования

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); 1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Введение

Цифровизация образовательного процесса в России и за рубежом является одним из ключевых направлений развития системы высшего образования. Это подтверждают национальные стратегии и международные инициативы в сфере электронного обучения. Использование цифровых технологий делает управление учебным процессом более эффективным и открывает новые возможности для анализа данных и прозрачности работы вуза. Одним из важных аспектов цифровизации образования является контроль посещаемости студентов. Этот показатель напрямую связан с уровнем дисциплины, степенью вовлеченности и академической успеваемостью обучающихся.

Традиционные методы учета посещаемости, такие как бумажные журналы или электронные таблицы, не соответствуют современным требованиям: они не обеспечивают высокой точности и скорости обработки данных, создают трудности при формировании сводной статистики и не позволяют эффективно масштабировать процесс в условиях большого числа обучающихся. Эти недостатки показывают необходимость создания систем, которые не только фиксируют посещаемость, но и анализируют данные в реальном времени.

Целью исследования является разработка концепции построения информационной системы мониторинга и анализа посещаемости студентов на базе веб-технологий. Предлагаемый подход построен на обосновании архитектурных и технологических решений, определении функциональной структуры и механизмов обработки данных. Концепция направлена на повышение эффективности управления учебным процессом, расширение аналитических возможностей и интеграцию с современными цифровыми образовательными платформами. Практическая значимость работы определяется ее применимостью для вузов, стремящихся повысить прозрачность образовательного процесса и эффективность управления академической успеваемостью.

Обзор существующих решений

Проблема автоматизации учета посещаемости студентов активно обсуждается в отечественной и зарубежной литературе. Наиболее простым вариантом остается использование электронных таблиц, обеспечивающих лишь базовую фиксацию данных, однако не обладающих достаточным аналитическим потенциалом и плохо адаптируемых к масштабным образовательным процессам [1, 2].

Достаточно распространенным решением является интеграция функций учета посещаемости в системы управления обучением (Learning Management System, LMS), такие как Moodle, Canvas или Blackboard. Подобные платформы позволяют учитывать посещаемость на уровне курса, но их внедрение требует настройки под конкретные программы и особенности организации вуза [3].

Особое внимание исследователей привлекают решения, основанные на технологиях идентификации. В ряде публикаций описаны прототипы систем, работающих с QR-кодами или электронными картами [4]. Эти методы позволяют ускорить процесс регистрации студентов на занятия и упростить ведение учета посещаемости, но требуют дополнительного оборудования и контроля, что усложняет эксплуатацию и требует дополнительного администрирования. Более современные системы используют биометрию и распознавание лиц. Они могут обеспечить высокую точность фиксации присутствия и исключают возможность подделки данных, однако сопряжены с высокими финансовыми затратами, а также повышенными требованиями к инфраструктуре [5, 6].

Отдельное направление связано с развитием аналитических модулей и интеллектуальных технологий. Исследования показывают, что методы машинного обучения помогают находить закономерности в активности студентов, прогнозировать снижение посещаемости и оценивать ее влияние на академические результаты [7]. При этом особое внимание уделяется защите персональных данных, что особенно важно в условиях цифровизации образовательного процесса [8].

В последние годы в России активно реализуется национальный проект «Цифровая образовательная среда». Согласно [9] наблюдается устойчивый рост внедрения в образовательный процесс информационных систем и веб-сервисов для учета учебной активности студентов. Эти тенденции подтверждают актуальность разработки специализированных решений, адаптированных к особенностям отечественных образовательных организаций.

Таким образом, обзор существующих решений показывает, что на практике отсутствует единое решение, которое сочетало бы простоту внедрения, низкую стоимость, удобство эксплуатации и развитые аналитические возможности. Это подтверждает актуальность разработки концепции специализированной веб-ориентированной системы, способной обеспечивать мониторинг и анализ посещаемости студентов с возможностью интеграции в цифровую образовательную среду.

Архитектура и технологии реализации системы

Разрабатываемая информационная система мониторинга и анализа посещаемости студентов основана на клиент-серверной архитектуре, что делает ее масштабируемой, гибкой и удобной в обслуживании. Серверная часть реализована с использованием фреймворка Spring Boot (Java), обеспечивающего функционирование REST API и работу с базой данных посредством Spring Data. В качестве системы управления базами данных выбрана PostgreSQL — она обеспечивает надежное хранение данных и поддержку аналитических запросов.

Клиентская часть системы создана на базе фреймворка React (TypeScript), что обеспечивает удобство взаимодействия пользователя с системой. Такой подход позволяет преподавателям и администраторам оперативно вводить и редактировать данные, а также получать отчеты и визуализированные результаты в реальном времени.

Архитектурная модель предполагает выделение трех основных уровней:

- уровень данных (база данных PostgreSQL);
- уровень логики (серверное приложение на Spring Boot);

– уровень представления (веб-интерфейс на React).

Такое разделение обеспечивает гибкость, возможность модификации отдельных компонентов без изменений всей системы, а также интеграцию с другими цифровыми сервисами образовательной организации (рис. 1).

Проектная реализация системы

Реализация концепции выполнена в форме веб-приложения, включающего три основных компонента: серверную часть, клиентскую часть и базу данных.

Серверная часть построена на базе Spring Boot, что позволяет клиентскому приложению надежно взаимодействовать с базой данных. С помощью REST API реализованы запросы на добавление и изменение данных, формирование отчетов и предоставление аналитической информации. Для доступа к базе данных используется Spring Data, что упрощает обработку сложных запросов.

Клиентская часть реализована с использованием фреймворка React и языка TypeScript, что позволило создать удобный и функциональный интерфейс для преподавателей и администраторов. Интерфейс поддерживает авторизацию пользователей и редактирование данных о посещаемости, а также визуализацию статистики в виде таблиц и графиков.

Хранилище данных организовано с использованием PostgreSQL. Структура базы данных включает таблицы, содержащие сведения о студентах, дисциплинах и посещаемости, что обеспечивает целостность данных и возможность их аналитической обработки.

Функциональность системы включает следующие задачи (рис. 2):

- авторизация пользователей и разграничение прав доступа;
- учет посещаемости по дисциплинам и отдельным занятиям;
- автоматическое формирование отчетов по различным параметрам (студент, группа, дисциплина);
- предоставление аналитических данных для преподавателей и администрации;

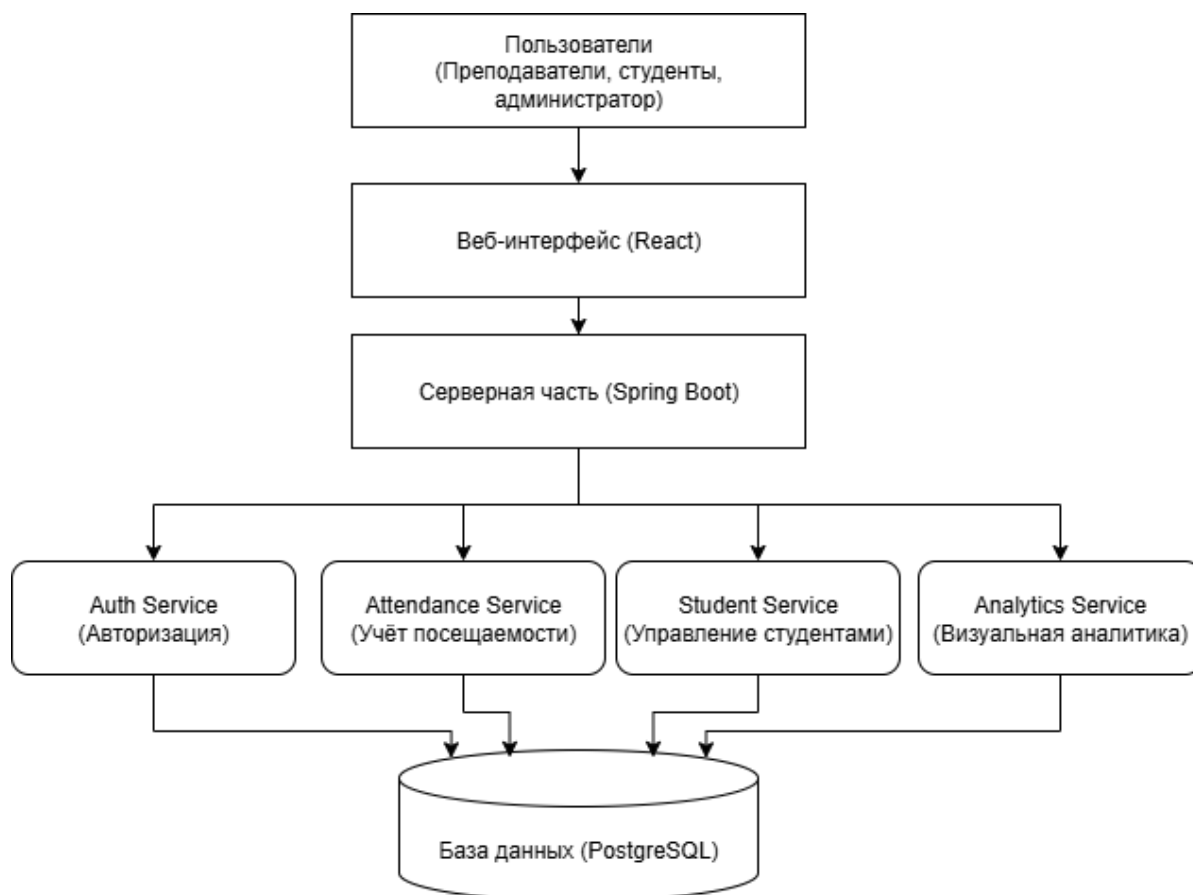


Рис. 1. Архитектурная схема информационной системы

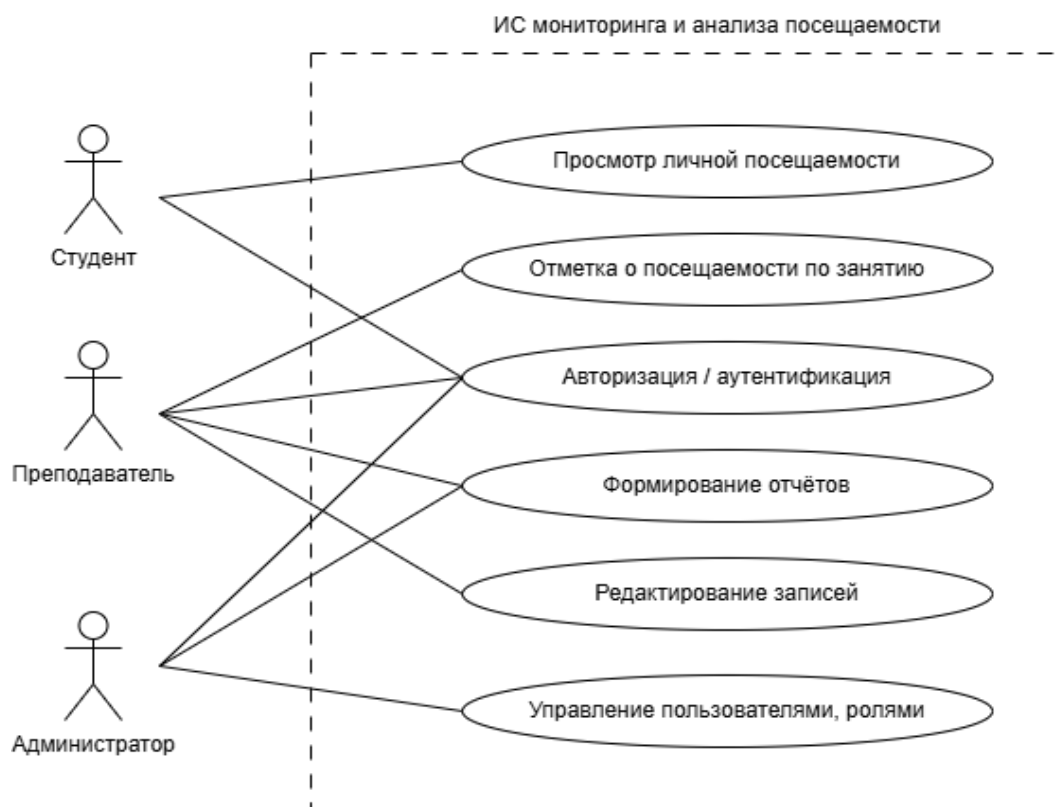


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования (Use Case)

- редактирование и корректировка ранее внесенных в базу данных записей;
- управление учетными записями пользователей и их ролями в системе.

Модель данных и организации хранения

Информационная система опирается на реляционную модель данных, включающую основные сущности учебного процесса: студенты, преподаватели, группы, дисциплины, занятия и посещаемость. Между сущностями устанавливаются связи типов «один ко многим» и «многие ко многим», что позволяет учитывать принадлежность студентов к группам и распределение занятий по дисциплинам.

Ключевая сущность системы — «Посещение». Она связывает конкретного студента с конкретным занятием и фиксирует факт присутствия, опоздания или отсутствия по уважительной причине. Такая структура позволяет формировать отчеты как по отдельным студентам, так и по группам и дисциплинам.

Выбор PostgreSQL в качестве системы управления базами данных обусловлен необходимостью хранения значительных объемов данных и поддержкой сложных аналитических запросов. Целостность данных поддерживается реляционными ограничениями, а история сохраняется за счет отказа от каскадного удаления записей. Для повышения производительности создаются индексы на

наиболее часто используемые поля, что ускоряет выполнение запросов при формировании отчетов и аналитических выборок.

Для реализации описанных функций была разработана структура базы данных, отражающая основные элементы учебного процесса (рис. 3).

Метрики анализа посещаемости

Для количественной оценки активности студентов и групп в образовательном процессе система формирует набор метрик, отражающих как индивидуальные, так и сводные показатели:

1. Индивидуальная метрика посещаемости — отношение числа посещенных студентом занятий к общему количеству проведенных занятий по дисциплине. Значение выражается в процентах и позволяет оценивать дисциплинированность и вовлеченность конкретного обучающегося.

2. Групповая метрика посещаемости — среднее значение индивидуальных показателей студентов академической группы. Данный показатель используется для сравнения посещаемости по различным дисциплинам и выявления проблемных участков в учебном процессе.

3. Динамическая метрика — измерение посещаемости по времени (например, по неделям или месяцам). Анализ динамики позволяет выявить периоды снижения активности студентов и принимать своевременные педагогические меры (рис. 4).

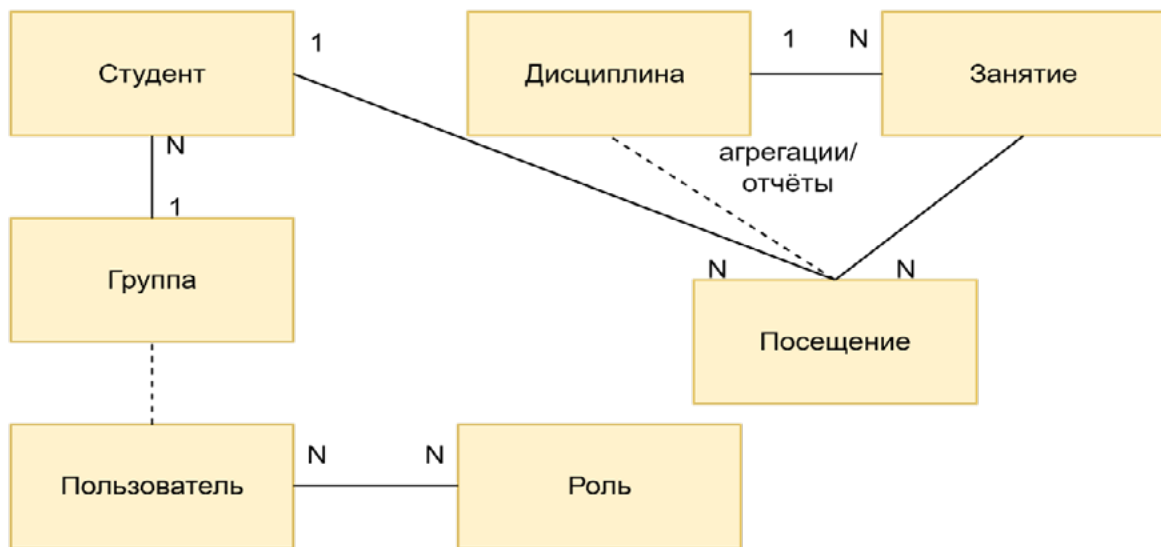


Рис. 3. Концептуальная ER-диаграмма

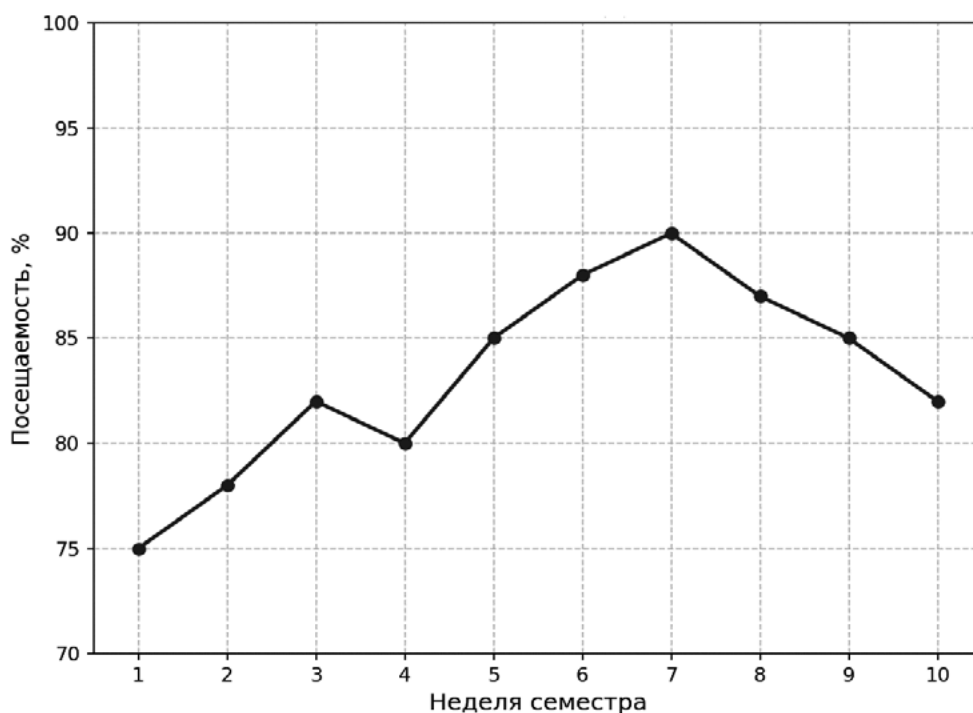


Рис. 4. Динамика посещаемости группы по неделям

4. Метрика учета опозданий — корректировка индивидуальной посещаемости с учетом частичных опозданий (например, опоздание учитывается как 0,5 посещения). Это делает анализ точнее и лучше отражает реальную активность студентов.

5. Сводные метрики — агрегированные данные, формируемые системой в виде таблиц и графиков. Они предназначены для анализа посещаемости на различных уровнях (по отдельному студенту, группе, дисциплине или учебному периоду) и используются как преподавателями, так и администраторами.

График на рис. 4 отражает постепенное повышение посещаемости в течение семестра, что позволяет выявлять периоды повышения и снижения учебной активности студентов.

Заключение

В статье представлена концепция построения информационной системы мониторинга и анализа посещаемости студентов на базе веб-технологий. Анализ существующих решений показал, что большинство из них либо слишком сложны в интеграции, либо требуют значительных ресурсов для внедрения, что ограничивает их использование в образовательных организациях. Это подчерки-

вает необходимость разработки более гибких и доступных систем.

Предлагаемая концепция информационной системы опирается на клиент-серверную архитектуру с использованием современных фреймворков и реляционной базы данных. Концепция основана на базе веб-технологий, обеспечивает кроссплатформенность, легкость интеграции и удобство эксплуатации. Реализованные метрики посещаемости позволяют оценивать активность студентов на индивидуальном и групповых уровнях, а визуализация данных обеспечивает удобство восприятия и наглядность информации.

Результаты проектной реализации подтверждают практическую применимость предложенного подхода: система автоматизирует сбор данных, формирование отчетности и упрощает работу преподавателей и администраторов.

Таким образом, представленная работа формирует основу для создания практических решений по автоматизации учета посещаемости студентов. В дальнейшем планируется расширить аналитические возможности системы, интегрировать ее с внешними образовательными платформами и добавить современные технологии идентификации студентов для повышения точности и автоматизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов Ю. А., Гуменникова А. В. Автоматизация учета посещаемости студентами учебных занятий // Решетневские чтения: материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (Красноярск, Россия, 10–12 ноября 2021 г.): в 2 ч. Ч. 2 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. С. 378–380.
2. Андреев Е. А., Хабитуев Б. В. Информационная система учета посещаемости студентов // Информационные системы и технологии в образовании, науке и бизнесе: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Улан-Удэ, Россия, 05 июля 2019 г.) / отв. ред. А. А. Тонхонова. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского гос. ун-та имени Доржи Банзарова, 2019. С. 4–11. DOI: 10.18101/978-5-9793-1397-9-4-11.
3. Басев И. Н., Голунова Л. В. Мониторинг учебной деятельности студентов в LMS Moodle (на примере дисциплины «Информатика») // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. 2019. № 2 (6). С. 29–36.
4. Intelligent Attendance System with Face Recognition Using the Deep Convolutional Neural Network Method / Nurkhamid, P. Setialana, H. Jati [et al.] // ICE-ELINVO 2020: Proceedings of the Third International Conference on Electrical, Electronics, Informatics, and Vocational Education (Yogyakarta, Indonesia, 05 October 2020). Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1737. Art. No. 012031. 9 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1737/1/012031.
5. Иванова Е. В., Струева А. Ю. Система учета посещаемости студентов на основе распознавания лиц // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2021. Т. 10, № 4. С. 60–73. DOI: 10.14529/cmse210404.
6. Банщиков А. О., Гируцкая А. А., Цапко И. В. Система учета посещаемости студентов // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, Россия, 03–07 декабря 2018 г.). Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2019. С. 206–207.
7. Алпатов А. В. Применение машинного обучения для анализа образовательных результатов студентов вузов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 4 (32). С. 67–78. DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.006.
8. Ситников А. Д., Федин Ф. О. Модель защиты информации в процессе учета успеваемости и посещаемости студентов // World of Science: сборник статей III Международной научно-практической конференции (Пенза, Россия, 30 марта 2023 г.) / отв. ред. Г. Ю. Гуляев. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 65–69.
9. Образование в цифрах: 2025: краткий статистический сборник / Т. А. Варламова, Л. М. Гохберг, О. А. Зорина [и др.]. М.: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, 2025. 136 с.

Дата поступления: 22.10.2025

Решение о публикации: 15.11.2025

The Concept of Building an Information System for Monitoring and Analyzing Student Attendance Based on Web Technologies

Andrey V. Zabrodin — PhD in History, Associate Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, data analytics, database design, web development, cloud technologies. E-mail: zabrodin@pgups.ru

Sofya D. Tarakanova — 4th year Bachelor’s Degree Student in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: web application development, information systems in education. E-mail: tarakanova_sof@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Zabrodin A. V., Tarakanova S. D. The Concept of Building an Information System for Monitoring and Analyzing Student Attendance Based on Web Technologies. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 63–71. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-63-71. (In Russian)

Abstract. *The growing volume of data and the shift of educational processes to digital environments necessitate the development of robust and scalable information systems for the tracking and analysis of academic activities. **Purpose:** to develop a conceptual model of a web-based information system aimed at monitoring student attendance, which will facilitate automating the collection, processing and presentation of data. **Methods:** Contemporary tools from the Spring Framework were applied, incorporating REST architecture, ORM technologies such as Hibernate and JPA, as well as the Spring Data repository layer. PostgreSQL were selected as the database solution, offering support for distributed query processing and optimization. **Results:** a conceptual model of the system has been proposed that features a multi-level architecture, a user management module and an analytical data processing component. Furthermore, strategies for the implementation of the service layer and client interaction have been outlined. A performance analysis has been conducted, validating the system’s stability in response to increased data volumes and a higher number of concurrent users. **Practical significance:** the proposed architecture is suitable for developing contemporary educational platforms that support the automation of tracking, analyzing and visualizing students’ academic performance. The solution developed can be integrated with current Learning Management Systems (LMS) and used to create adaptive digital educational services.*

Keywords: *information system, web technologies, attendance monitoring, data analysis, digitalization of education*

REFERENCES

1. Kuznetsov Y. A., Gumennikova A. V. Avtomatizatsiya ucheta poseshchaemosti studentami uchebnykh zanyatiy [Accounting of Students’ Attendance of Study Activities Automation], *Reshetnevskie chteniya: materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Reshetnev Readings: Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference], Krasnoyarsk, Russia, November 10–12, 2021. Vol. 2. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2021, Pp. 378–380. (In Russian)
2. Andreev E. A., Khabituev B. V. Informatsionnaya sistema ucheta poseshchaemosti studentov [Information System of Students Attendance Accounting], *Informatsionnye sistemy i tekhnologii v obrazovanii, nauke i biznese: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Information Systems and Technologies in Education, Science and Business: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference], Ulan-Ude, Russia, July 05, 2019. Ulan-Ude: Banzarov Buryat State University Publishing House, 2019, Pp. 4–11. DOI: 10.18101/978-5-9793-1397-9-4-11. (In Russian)

3. Basev I. N., Golunova L. V. Monitoring uchebnoy deyatelnosti studentov v LMS Moodle (na primere distsipliny “Informatika”) [Monitoring of Student Educational Activities in LMS Moodle (on the Example of Information Technology Subject)], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya: Gumanitarnye issledovaniya* [The Siberian Transport University Bulletin: Humanitarian Research], 2019, No. 2 (6), Pp. 29–36. (In Russian)
4. Nurkhamid, Setialana P., Jati H., et al. Intelligent Attendance System with Face Recognition Using the Deep Convolutional Neural Network Method, *ICE-ELINVO 2020: Proceedings of the Third International Conference on Electrical, Electronics, Informatics, and Vocational Education, Yogyakarta, Indonesia, October 05, 2020. Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1737, Art. No. 012031, 9 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1737/1/012031.
5. Ivanova E. V., Strueva A. Yu. Sistema ucheta poseshchaemosti studentov na osnove raspoznavaniya lits [The Student Attendance Control System Based on Face Recognition], *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Vychislitel'naya matematika i informatika”* [Bulletin of the South Ural State University. Series “Computational Mathematics and Software Engineering”], 2021, Vol. 10, No. 4, Pp. 60–73. DOI: 10.14529/cmse210404. (In Russian)
6. Banshchikov A. O., Girutskaya A. A., Tsapko I. V. Sistema ucheta poseshchaemosti studentov [Student attendance accounting system], *Molodezh i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and modern information technologies: proceedings of the XVI International scientific and practical conference of students, graduate students, and young scientists], Tomsk, Russia, December 03–07, 2018. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2019, Pp. 206–207. (In Russian)
7. Alpatov A. V. Primenenie mashinnogo obucheniya dlya analiza obrazovatelnykh rezultatov studentov vuzov [Application of Machine Learning to Analyze Academic Performance of University Students], *Informatsionnyye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2023, No. 4 (32), Pp. 67–78. DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.006. (In Russian)
8. Sitnikov A. D., Fedin F. O. Model zashchity informatsii v protsesse ucheta uspevaemosti i poseshchaemosti studentov [The Model of Information Protection in the Process of Accounting for Students’ Academic Performance and Attendance], *World of Science: sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [World of Science: Proceedings of the III International Scientific Conference], Penza, Russia, March 30, 2023. Penza, International Centre for Scientific Cooperation “Science and Education”, 2023, Pp. 65–69. (In Russian)
9. Varlamova T. A., Gokhberg L. M., Zorina O. A., et al. Obrazovanie v tsifrakh: 2025: kratkiy statisticheskiy sbornik [Education in Numbers: 2025: Brief Statistical Digest]. Moscow, Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge of the Higher School of Economics, 2025, 136 p. (In Russian)

Received: 22.10.2025

Accepted: 15.11.2025

УДК 004.4

Будущее цифровых медиа: влияние метавселенной и Web 3.0 на качество информации

Петрушичева Анастасия Юрьевна — магистрант 2-го курса направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии». Научные интересы: информационные системы, искусственный интеллект, виртуальная и дополненная реальности. E-mail: nastyapetrushicheva@gmail.com

Ермаков Сергей Геннадьевич — д-р технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: обработка данных, корпоративные хранилища данных, безопасность данных. E-mail: ermakov@pgups.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Петрушичева А. Ю., Ермаков С. Г. Будущее цифровых медиа: влияние метавселенной и Web 3.0 на качество информации // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 72–78. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-72-78

Аннотация. Рассматриваются концепции метавселенной и Web 3.0, исследуемые как рычаги технологического прогресса в цифровых СМИ, их роль и применение в будущем. Раскрывается понятие иммерсивной журналистики, в которой происходит слияние традиционных методов создания материалов с новейшими цифровыми технологиями. При всех преимуществах данной концепции возникают и некоторые риски, поскольку многие вопросы ввиду новизны этой темы еще не были приняты во внимание. **Цель:** изучение воздействия концепций Web 3.0 и метавселенной на качество и восприятие контента и на медиасферу в целом, а также выявление преимуществ, рисков и перспектив их внедрения. **Результаты:** показывают, что метавселенная и новые цифровые концепции меняют структуру и форматы контента (иммерсивная журналистика, виртуальные материалы) и методы монетизации через токенизацию и NFT. Выявлены определенные риски в виде возникновения дипфейков и технических сложностей, а также неоднозначность с юридической точки зрения. **Практическая значимость:** исследование будет полезно как для журналистов и работников медиаиндустрии, так и для разработчиков систем и блокчейн-инженеров.

Ключевые слова: цифровые медиа, метавселенная, Web 3.0, виртуальный мир, современная журналистика, блокчейн, иммерсивная журналистика, токенизация, монетизация, виртуальная реальность, дополненная реальность, NFT

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); 1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Введение

За последнее десятилетие происходит активный процесс цифровизации всех сфер нашей жизни, и медиасреда не стала исключением. Благодаря этому расширяются возможности и для тех, кто создает контент, и для тех, кто его изучает и потребляет. Так, в эпоху развития информационных технологий появились довольно перспективные направления, развивающие цифровые медиа: метавселенная и Web 3.0, а также блокчейн и децентрализованные сети. Такого рода технологии способны радикально изменить процесс создания, распространения и монетизации контента, а также то, как аудитория взаимодействует с информацией.

Современная журналистика уже может похвастаться множественными трансформациями: от появления всемирной паутины до распространения алгоритмов персонализированного контента. Тем не менее метавселенная и Web 3.0 предлагают новейший уровень взаимодействия, поскольку теперь информация и контент предстают перед читателями не просто в доступной форме, но еще и в интерактивной.

В статье исследуется, как и каким образом Web 3.0 и метавселенная способны изменить концепцию цифровых медиа, какие ресурсы и возможности они могут дать и с какими трудностями могут столкнуться медиасреда и социальные платформы в условиях внедрения нового цифрового пространства.

Web 3.0 и метавселенная: понятия и концепции

Как упоминалось выше, эволюция медиа в сфере цифровизации во многом связана с развитием двух технологий — Web 3.0 и метавселенной.

Web 3.0 — это концепция интернета, основанная на технологии блокчейн, которая в ближайшем будущем будет доступна массовому пользователю. Конечно, Web 3.0 находится еще на стадии возникновения, поэтому никто пока не может ясно определить, каким будет данный скачок в революции интернета. Основной характеристикой концепции является децентрализация, то есть информация и иные данные не будут находиться на одном сервере, они рассеются среди пользователей. При-

знаками Web 3.0 являются искусственный интеллект и машинное обучение, которые, возвращаясь к теме медиа, все также будут помогать пользователям фильтровать и находить нужный им контент. Немаловажно упомянуть и семантическую паутину как характеристику Web 3.0, ведь до сих пор искусственный интеллект часто делает ошибки и все еще плохо понимает простой человеческий язык. Поэтому, во избежание дальнейших ошибок, в будущем планируется использовать технологию семантической паутины, когда из сети можно получить информацию вида «предмет — вид взаимосвязи — другой предмет» [1].

Термин «метавселенная» впервые появился в 1992 году в научно-фантастическом романе «Лавина». Именно в нем автор Нил Стивенсон (Neal Stephenson) упоминает виртуальный мир в качестве наследника интернета. Данный термин употребляется для характеристики одного из принципов Web 3.0 и описывает цифровые платформы с упором на технологии виртуальной реальности.

Две эти концепции преследуют одну цель — создание ясного, децентрализованного и интерактивного пространства, только Web 3.0 ориентирован на пересмотр основ управления данными и цифрой собственности, а метавселенная работает над изменением методов взаимодействия с контентом и аудиторией [2].

Метавселенная: цифровой мир нового поколения

Итак, метавселенная — это виртуальный мир, в котором люди имеют возможность вести свой бизнес, взаимодействовать с другими людьми, учиться и т. д. Если говорить о традиционном интернете, то до сих пор мы взаимодействуем с источниками информации через экраны мониторов. Метавселенная же дает возможность людям погрузиться в информационную среду путем применения технологий виртуальной (virtual reality, VR) и дополненной (augmented reality, AR) реальностей. Классификация метавселенных представлена в табл. 1.

Отличительная черта метавселенной состоит в том, что она создает интерактивную среду, в ко-

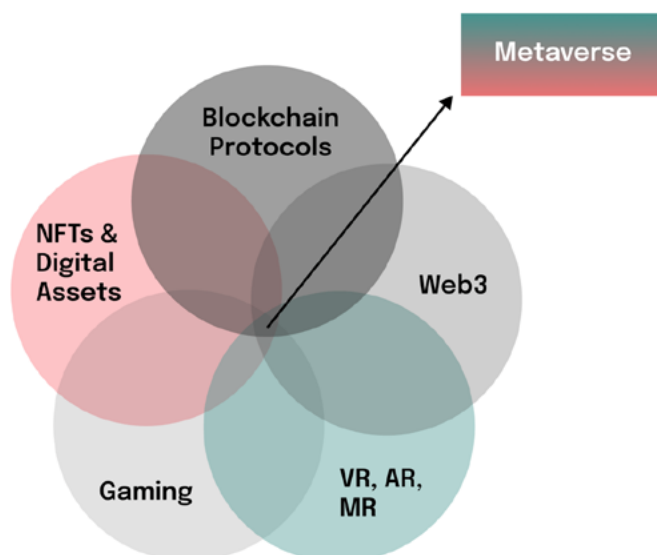
торой человек взаимодействует с информацией и другими пользователями на новом уровне. Метавселенная состоит из элементов (технологий), которые представлены на рис. 1.

Одним из основных элементов метавселенной, обеспечивающим децентрализованность и ясность системы, является блокчейн, благодаря которому все данные пользователей и цифровые активы находятся в распоряжении самих хозяев этих данных, а не контролируются одной конкретной организацией [3].

Web 3.0: новая архитектура интернета

Web 3.0 можно охарактеризовать как символ нового поколения интернета, который основывается на технологии децентрализации. Если сравнить его с Web 2.0, то в последнем все управляется централизованно, а цифровые сервисы находятся во владении больших корпораций. Как и метавселенная, Web 3.0 делает упор на блокчейн, тем самым контролируя данные и гарантируя безопасность транзакций.

В сфере цифровых медиа Web 3.0 предоставляет варианты систем финансирования контента: так, например, журналисты и издательства могут зарабатывать не только через рекламу, но и через



Источник: <http://cryptoast.fr/web-3-version-decentralisee-internet>

Рис. 1. Метавселенная и ее составные части

NFT, краудфандинг на блокчейне и микротранзакции с использованием криптовалют.

Итак, можно резюмировать, что Web 3.0 создаст предпосылки для возникновения новой медиасреды, в которой тот или иной контент все больше имеет признаки интерактивности, а также становится более защищенным от воздействия централизованного контроля [4].

Таблица 1

Классификация метавселенных по принципу представления изображений

	Дополненная реальность (Augmented reality)	Лайфлоггинг (Lifeloggng)	Зеркальный мир (Mirror world)	Виртуальная реальность (Virtual reality)
Определение	Технология, позволяющая дополнять окружающий и физический мир цифровыми объектами. AR уже достаточно давно используется в производстве фильмов и на телевидении — так называемая компьютерная графика является одним из вариантов создания дополненной реальности	Технология автоматического фиксирования повседневной жизни человека с использованием портативных, компактных (носимых) технических устройств и систем	Представление реального мира в цифровой форме с географически точным отображением структуры реального мира. Зеркальные миры предлагают утилитарную программную модель реальной среды обитания человека и ее функционирования. Это очень похоже на концепцию цифрового двойника	Компьютерная симуляция пространства, в которое через воздействие на рецепторы (зрение, слух, обоняние, тактильные ощущения) погружается пользователь. Проводником пользователя в виртуальную реальность выступают устройства 3D-визуализации, наиболее распространенным из которых является специальный шлем
Действующие проекты	Pokemon Go, Snapchat, электронные учебники, эндоскопы, смарт-шлемы для военных летчиков	Facebook ¹ , Instagram ² , Apple Watch, Samsung Health, Nike Plus	Google Earth, Google Maps, Naver Maps, Airbnb	Second Life, Minecraft, Roblox, Zepeto, Decentraland

¹ Facebook принадлежит компании Meta, признанной экстремистской организацией и запрещенной в РФ.

² Instagram принадлежит компании Meta, признанной экстремистской организацией и запрещенной в РФ.

Как метавселенная изменит медиасреду?

Роль метавселенной в подготовке контента и распространении его в массы значительно возрастет. У журналистов появится возможность создать более живой и проникновенный материал, который вовлечет большее количество читателей, ведь все хотят как можно глубже узнать суть происходящего и как можно лучше на себе это прочувствовать. В этом случае на помощь придут виртуальная и дополненная реальности, которые позволят людям своими глазами увидеть все то, что описывается в материале. Это способствует созданию иммерсивной журналистики, подробнее о которой будет сказано ниже [5].

Иммерсивная журналистика: новый уровень восприятия информации

Возникновение иммерсивной журналистики является результатом радикального изменения, которое принесла в свет метавселенная. Раскроем данное понятие.

Иммерсивная журналистика — это составляющая медиапространства, форма журналистского производства, которая позволяет от первого лица наблюдать за событиями или ситуациями, описанными в новостных репортажах и документальных фильмах. Такой формат кардинально отличается от привычных всем видеоматериалов, поскольку каждый зритель может переместиться в виртуальный мир и увидеть, услышать и прочувствовать все описываемое в материале. Есть даже возможность взаимодействия с объектами внутри этого мира [6].

Например, в метавселенной репортаж о прошедшем цунами представляется зрителям не как стандартный фото- или видеоматериал, а как полностью смоделированная симуляция этих событий. Зритель может использовать VR-гарнитуру и с ее помощью обмануть свой мозг: он психологически переключится на те эмоции, переживания и ощущения, которые продемонстрированы в виртуальном мире. Это важный шаг в развитии цифровой журналистики, так как человек благодаря данным технологиям сможет более объективно оценивать происходящее и формировать более четкую индивидуальную позицию.

Огромный потенциал в медиасфере открывает и дополненная реальность. Так, изучая статью, читатель может нажать на представленный в ней AR-объект, тем самым приведя его в действие. Далее этот объект показывает оживленные исторические материалы, визуализированные сложные данные, которые было бы трудно понять без определенных манипуляций [7].

Новые форматы контента и взаимодействия с аудиторией

В ближайшем будущем метавселенная преобразует не только способы представления информации, но и сами медиаплатформы. Вполне вероятно, что человечество может ожидать полностью виртуальные новостные студии, где журналисты будут вести эфиры с 3D-новостями в цифровом мире.

Также метавселенная позволит читателям перейти на новый уровень, повысив их степень вовлеченности в материал: при стандартной возможности прочитать новости аудитория сможет непосредственно участвовать в различных дебатах и интервью, где могут задавать вопросы онлайн [8].

Монетизация через NFT и токенизацию контента

Эволюция технологий хороша еще тем, что с появлением возможности создавать цифровой контент журналисты могут продавать свои авторские статьи, очерки и расследования в формате NFT, что способствует возникновению новых источников дохода. NFT — это технология, позволяющая закреплять за пользователем право владения электронным активом, тем самым подтверждая его уникальность. Материалы журналистов зачастую имеют ценную и труднодоступную информацию, которая необходима читателям, и многие готовы покупать этот материал за большие деньги [9].

Вызовы и риски

Как можно было убедиться выше, преимуществ у рассматриваемых метавселенной и Web 3.0 множество, однако есть и некоторые риски.

1. Ввиду больших возможностей создания практически любых цифровых продуктов не ис-

ключается возникновение дипфейков, манипулятивных фото- и видеоматериалов, а также создание искаженной виртуальной реальности, которая создаст искаженное общественное мнение.

2. Технические возможности.

Для того чтобы внедрить VR, AR и блокчейн в массы, необходимы большие вычислительные мощности, которые не у всех пользователей имеются в доступе [10].

3. Юридический аспект.

Такая глобальная цифровая сфера имеет множество нюансов и тонкостей, и в случае возникновения вопросов насчет авторских прав, цифровой идентичности и прочего специалисты пока не смогут дать точный ответ и найти пути разрешения конфликтов. Ввиду своей новизны этот вопрос все еще не проработан.

Заключение

В статье были разобраны основные понятия и возможности новых концепций нашего времени — метавселенной и Web 3.0, которые стали своеобразной технологической новинкой. Они переводят человечество на новый уровень формирования, публикации и монетизации информации, что делает взаимодействие аудитории с авторами и изданиями более эффективными.

Web 3.0 имеет ряд особенностей и характеристик, которые отличают его от более ранней версии Web 2.0, а именно обеспечение децентрализации и появление возможности монетизации контента. В статье упоминаются блокчейн-технологии, на которых, собственно, и основывается новая кон-

цепция Web 3.0. Блокчейны помогают медиакомпаниям обходить цензуру и способствуют возникновению ясной системы владения электронными активами. Также упомянуты действующие механизмы, которые являются источником доходов для журналистов — это NFT и токенизация.

С развитием метавселенной появился новый термин в медиасреде — «иммерсивная журналистика». Ее особенность в том, чтобы с помощью технологий дополненной и виртуальной реальности максимально погрузить читателя в описываемое событие, что создаст прямой эффект присутствия и позволит глубже и более объективно оценивать ситуацию, пропустив ее через себя. Кроме того, метавселенная предоставляет аудитории возможность прямого контакта с участниками дебатов и пресс-конференций в виртуальной реальности.

Но при всех больших преимуществах этих концепций существуют и риски. Здесь высока вероятность появления дипфейков и манипулятивных материалов, которые могут исказить представление читателя. Здесь же и частичная техническая недосыгаемость внедрения VR/AR в массы, учитывая значительные финансовые затраты. Кроме того, юридическая неопределенность создает сложности в регулировании авторских прав, цифровой идентичности и механизмов контроля контента.

Со временем эти вопросы будут решены. Сейчас метавселенная и Web 3.0 находятся на начальной стадии развития, и, ввиду своей новизны, множество вопросов еще не приняты во внимание. Их внедрение требует ответственного подхода, технической доработки и законодательной базы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шкарупета Е. В. Web 3.0: эволюция и практические приложения децентрализованного управления цифровым потенциалом промышленных систем // Цифровая и отраслевая экономика. 2022. № 3–4 (28). С. 106–114.
2. Web3 и Метавселенная: что они из себя представляют и как работают? // B2BROKER. 2022. 12 июля. URL: <http://b2broker.com/ru/news/web3-metaverse-what-is-it-and-how-does-it-work> (дата обращения: 05.02.2025).
3. Мальсагова Р. Г., Дугаев М. В., Ефремова С. А. Блокчейн, криптовалюта, NFT, Web3.0 и SMART-контракт как технологии развития и масштабирования метавселенных // Инновации и инвестиции. 2023. № 11. С. 199–207.
4. Шатухин Д. Что такое Web 3.0, и почему он всем стал нужен // Хабр. 2022. 26 февраля. URL: <http://habr.com/ru/articles/653533> (дата обращения: 05.02.2025).
5. Лукьянчикова А. С. Особенности продвижения российских медиа в метавселенных // Вопросы медиабизнеса. 2022. Т. 1, № 4. С. 37–43. DOI: 10.24412/3034-1930-2022-0280.

6. Осиповская Е. А. Технологии виртуальной реальности как новый инструмент журналистики // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: История, филология. 2018. Т. 17, № 6. С. 78–83. DOI: 10.25205/1818-7919-2018-17-6-78-83.
7. Иммерсивная журналистика: подходы к теории и проблемам образования / А. В. Замков, М. А. Крашенинникова, М. М. Лукина, Н. А. Цынарева // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13, № 1. С. 166–172. DOI: 10.25559/SITITO.2017.1.427.
8. Каминская Т. Л. Медиа в структуре метавселенных и контроль цифровой коммуникации // Гуманитарные науки. Вестник Финансового университета. 2023. Т. 13, № 5. С. 22–26. DOI: 10.26794/2226-7867-2023-13-5-22-26.
9. NFT: что это и почему так популярна эта технология // vc.ru. 2022. 14 июня. URL: <http://vc.ru/marketing/442128-nft-cto-eto-i-pochemu-tak-populyarna-eta-tehnologiya> (дата обращения: 05.02.2025).
10. Иванова А. В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3 (108). С. 88–107. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-3-88-107.

Дата поступления: 12.10.2025

Решение о публикации: 30.10.2025

The Future of Digital Media: The Impact of the Metaverse and Web 3.0 on Information Quality

Anastasiya Yu. Petrushicheva — 2nd year Master’s Degree Student in 09.04.02 Information Systems and Technologies. Research interests: information systems, artificial intelligence, virtual and augmented reality. E-mail: nastyapetrushicheva@gmail.com

Sergey G. Ermakov — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: data processing, corporate data storage, data security. E-mail: ermakov@pgups.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Petrushicheva A. Yu., Ermakov S. G. The Future of Digital Media: The Impact of the Metaverse and Web 3.0 on Information Quality. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 72–78. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-72-78. (In Russian)

Abstract. *The paper explores the concepts of the metaverse and Web 3.0, analyzing them as catalysts for technological progress in digital media and their prospective roles and applications. It highlights the concept of immersive journalism, which merges traditional content creation methods with the latest digital technologies. Despite the numerous advantages offered by this concept, certain risks persist, as many challenges remain unaddressed owing to the novelty of the subject matter. **Purpose:** to investigate how the concepts of Web 3.0 and the metaverse influence the quality and perception of content, and the broader media landscape, while identifying the benefits, risks, and future prospects associated with their implementation. **Results:** the findings indicate that the metaverse and emerging digital concepts are transforming content structures and formats, including immersive journalism and virtual materials, along with altering monetization strategies through tokenization and NFTs. Certain risks have been identified in the form of deepfakes, technical complications, and legal ambiguities. **Practical significance:** the research will be useful for journalists and media professionals, as well as for system developers and blockchain engineers.*

Keywords: digital media, metaverse, Web 3.0, virtual world, contemporary journalism, blockchain, immersive journalism, tokenization, monetization, virtual reality, augmented reality, NFT

REFERENCES

1. Shkarupeta E. V. Web 3.0: evolyutsiya i prakticheskie prilozheniya detsentralizovannogo upravleniya tsifrovym potentsialom promyshlennykh sistem [Web 3.0: Evolution and Practical Applications of Decentralized Digital Capacity Management of Industrial Systems], *Tsifrovaya i Otrasleyaya Ekonomika*, 2022, No. 3–4 (28), Pp. 106–114. (In Russian)
2. Web3 i Metavseleynaya: Chto oni iz sebya predstavlyayut i kak rabotayut? [Web3 and the Metaverse: What Are They and How Do They Work?], *B2BROKER*. Published online at July 12, 2022. Available at: <http://b2broker.com/ru/news/web3-metaverse-what-is-it-and-how-does-it-work> (accessed: February 05, 2025). (In Russian)
3. Malsagova R. G., Dugaev M. V., Efremova S. A. Blokcheyn, kriptovalyuta, NFT, Web3.0 i SMART-kontrakt kak tekhnologii razvitiya i masshtabirovaniya metavseleynnykh [Blockchain, Cryptocurrency, NFT, Web3.0 and SMART Contract as Technologies for Developing and Scaling Metaverses], *Innovatsii i investitsii [Innovation and Investment]*, 2023, No. 11, Pp. 199–207. (In Russian)
4. Shatukhin D. Chto takoe Web 3.0, i pochemu on vsem stal nuzhen [What is Web 3.0, and why does everyone need it?], *Khabr [Habr]*. Published online at February 26, 2022. Available at: <http://habr.com/ru/articles/653533> (accessed: February 05, 2025). (In Russian)
5. Lukyanchikova A. S. Osobennosti prodvizheniya rossiyskikh media v metavseleynnykh [Features of the Promotion of Russian Media in the Metaverse], *Voprosy mediabiznesa [Issues of Media Business]*, 2022, Vol. 1, No. 4, Pp. 37–43. DOI: 10.24412/3034-1930-2022-0280. (In Russian)
6. Osipovskaya E. A. Tekhnologii virtualnoy realnosti kak novyy instrument zhurnalistiki [Virtual Reality Technologies as a New Toolkit of Journalism], *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya, filologiya [Vestnik NSU. Series: History and Philology]*, 2018, Vol. 17, No. 6, Pp. 78–83. DOI: 10.25205/1818-7919-2018-17-6-78-83. (In Russian)
7. Zamkov A. V., Krashennnikova M. A., Lukina M. M., Tsynareva N. A. Immersivnaya zhurnalistika: podkhody k teorii i problemam obrazovaniya [Immersive Journalism: Approaches to Theory and Problems of Education], *Sovremennyye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern Information Technologies and IT-Education]*, 2017, Vol. 13, No. 1, Pp. 166–172. DOI: 10.25559/SITITO.2017.1.427. (In Russian)
8. Kaminskaya T. L. Media v strukture metavseleynnykh i kontrol tsifrovoy kommunikatsii [Media in the Structure of Metaverse and Control of Digital Communication], *Gumanitarnyye nauki. Vestnik Finansovogo universiteta [Humanities and Social Sciences. Bulletin of the Financial University]*, 2023, Vol. 13, No. 5, Pp. 22–26. DOI: 10.26794/2226-7867-2023-13-5-22-26. (In Russian)
9. NFT: chto eto i pochemu tak populyarna eta tekhnologiya [NFT: What is it and why is this technology so popular], *vc.ru*. Published online at June 14, 2022. Available at: <http://vc.ru/marketing/442128-nft-chto-eto-i-pochemu-tak-populyarna-eta-tehnologiya> (accessed: February 05, 2025). (In Russian)
10. Ivanova A. V. Tekhnologii virtualnoy i dopolnennoy realnosti: vozmozhnosti i prepyatstviya primeneniya [VR & AR Technologies: Opportunities and Application Obstacles], *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment [Strategic Decisions and Risk Management]*, 2018, No. 3 (108), Pp. 88–107. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-3-88-107. (In Russian)

Received: 12.10.2025

Accepted: 30.10.2025

УДК 004.9:378:656

Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация структуры образовательных программ транспортного вуза в условиях перехода к национальной модели высшего образования

Сергеева Дарья Владимировна — ассистент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. E-mail: dsergeeva@pgups.ru

Баталов Дмитрий Иннокентьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, программные роботы, нейронные сети. E-mail: d.i.batalov@yandex.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сергеева Д. В., Баталов Д. И. Математическое моделирование и многокритериальная оптимизация структуры образовательных программ транспортного вуза в условиях перехода к национальной модели высшего образования // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 79–88. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-79-88

Аннотация. *Цель:* устранение методологического разрыва между динамичными требованиями рынка труда в условиях цифровой трансформации транспорта и инерционностью процессов проектирования основных профессиональных образовательных программ (ОПОП). *Методы:* на основе системного анализа классифицированы существующие подходы к моделированию ОПОП. Для формализации структуры программы применен аппарат теории графов, для обработки требований работодателей — методы интеллектуального анализа данных. *Результаты:* выявлена ограниченность экспертных и онтологических подходов при работе с большими массивами данных рынка труда. Разработана новая математическая модель ОПОП в виде взвешенного ориентированного графа $G = (V, E)$, вершины которого интегрируют дисциплины, компетенции и требования работодателей (профстандарты, вакансии). Впервые введен интегральный показатель качества программы, рассчитываемый как аддитивная свертка критериев полноты покрытия компетенций и связности графа. *Практическая значимость:* предложенная модель и алгоритмы создают базис для автоматизированной системы поддержки принятия решений, позволяющей сократить сроки адаптации образовательных программ под запросы таких высокотехнологичных сфер, как беспилотный транспорт и цифровая логистика, обеспечивая переход к доказательному управлению образованием.

Ключевые слова: математическое моделирование, образовательная программа, ориентированный граф, интеллектуальный анализ данных, цифровая трансформация транспорта, интегральный показатель качества, система поддержки принятия решений

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); 1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Введение

Глобальная трансформация российской системы высшего образования, инициированная Указом Президента РФ [1], знаменует собой не просто смену номенклатуры направлений, а фундаментальный отказ от жесткой двухуровневой Болонской модели в пользу суверенной национальной системы. Переход к уровням «базового» (срок обучения 4–6 лет) и «специализированного» высшего образования ставит перед университетским сообществом задачу беспрецедентной методической и управленческой сложности. Если ранее в уравнении проектирования образовательных программ параметр времени T являлся константой (4 года для бакалавриата), то теперь он переходит в статус переменной, значение которой функционально зависит от сложности квалификационных требований и отраслевой специфики.

В новой архитектуре, как отмечается в стратегических материалах Министерства науки и высшего образования РФ, ключевым системообразующим элементом становится «единое фундаментальное ядро», обеспечивающее связность образовательного пространства страны [2]. Для технических университетов это создает нетривиальную оптимизационную коллизию: каким образом синтезировать структуру программы, которая при вариативности сроков обучения обеспечивала бы необходимый баланс между фундаментальностью и узкопрофильной специализацией? Интуитивные решения, опирающиеся на эмпирический опыт («давайте просто добавим один год обучения»), в текущих экономических условиях становятся неэффективными и методически рискованными.

Ситуация в транспортном образовании осложняется жестким детерминизмом со стороны стратегических партнеров. Утвержденная в конце 2024 года совместная Программа Минтранса России и ОАО «РЖД» по поддержке университетских комплексов до 2030 года задает вектор на подготовку кадров для эксплуатации высокоскоростных магистралей и беспилотных транспортных систем [3]. Фактически работодатель формирует жесткие «граничные условия» для моделируемой системы, требуя ин-

теграции в учебные планы компетенций, которые ранее относились к разным уровням образования или вовсе отсутствовали в классических инженерных школах.

Одновременно с этим происходит агрессивная цифровая трансформация отрасли. Опыт создания цифрового кластера на базе Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС) наглядно демонстрирует, что современные инженерные компетенции невозможны без глубокой IT-подготовки [4]. Возникает структурный конфликт: механическое добавление цифровых модулей (Data Science, BIM-технологии) в граф образовательной программы линейно увеличивает ее трудоемкость. При жестком ограничении общего срока обучения это неизбежно требует исключения либо компрессии других дисциплин. Решение этой задачи сугубо экспертными методами, опирающимися на «ощущения» методистов, ведет к ошибкам проектирования — разрыву логических связей между дисциплинами (пререквизитов) или критической перегрузке обучающихся.

Существующие подходы к математическому моделированию образовательных систем, описанные в работах отечественных и зарубежных авторов [5, 6], а также подробно проанализированные в предыдущем исследовании [7], фокусируются преимущественно на оценке качества уже созданных учебных планов или оптимизации расписаний, то есть решают задачи анализа статических систем. Однако в условиях текущей реформы требуется **структурный синтез** новых образовательных моделей. На данный момент наблюдается дефицит формализованных методов, позволяющих осуществить переход от набора разрозненных требований (ФГОС, Программа ОАО «РЖД», цифровые компетенции) к оптимальному графу образовательной программы с математически обоснованным сроком обучения.

В настоящей работе предлагается теоретический подход к решению данной проблемы методами системного анализа и математического

моделирования. **Целью исследования** является разработка формальной модели и алгоритма многокритериальной оптимизации структуры основной профессиональной образовательной программы, позволяющих найти баланс между фундаментальным ядром, специализированными требованиями работодателя и сроками подготовки. Работа закладывает теоретический и алгоритмический фундамент для создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений, проектирование которой является следующим этапом исследования.

Математическое моделирование и постановка задачи оптимизации

Формализация процесса проектирования основных профессиональных образовательных программ требует перехода от эвристических и экспертных оценок к строгим математическим методам, позволяющим оперировать количественными метриками качества и структурной связности. В современной научной литературе задача синтеза учебных планов рассматривается как многофакторная проблема, лежащая на стыке теории графов, системного анализа и интеллектуальной обработки данных.

Фундаментальные подходы к расчету параметров учебных планов с учетом логических зависимостей между дисциплинами были заложены в [8], где акцент делался на оптимизации распределения ресурсов времени. Однако в условиях цифровой трансформации экономики статические модели требуют расширения за счет внедрения адаптивных механизмов. Современные исследователи [9, 10] предлагают использовать методы интеллектуальной поддержки и нейросетевого анализа для динамической актуализации образовательного контента под требования рынка труда, что коррелирует с международными практиками автоматизированного извлечения навыков из вакансий [11].

Особую значимость в контексте построения архитектуры образовательных программ приобретают методы структурного анализа и теории графов, позволяющие визуализировать и верифицировать логику педагогического процесса [12]. При этом

проектирование не может ограничиваться только топологией учебного плана; критически важным становится содержательное наполнение программ цифровыми компетенциями. Опираясь на европейские рамки цифровых компетенций [13] и современные исследования в области оценки цифровых навыков [14], необходимо интегрировать в математическую модель не только временные и ресурсные ограничения, но и семантические параметры качества подготовки.

Разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений для управления учебными планами, рассматриваемая в работе планами [15], а также методология проектирования автоматизированных систем управления [16] создают базис для алгоритмизации процессов разработки ОПОП. Тем не менее специфика перехода к национальной модели высшего образования с вариативными сроками обучения требует создания специализированной параметрической модели, способной связать воедино требования фундаментальности образования и узкопрофильные запросы индустриальных партнеров.

Параметрическая графовая модель образовательной программы

Для решения задачи структурного синтеза ОПОП в условиях вариативности сроков обучения (от 4 до 6 лет) предлагается отойти от традиционного матричного представления учебного плана. В настоящем исследовании структура программы формализована как ориентированный ациклический граф (DAG) $G_T = (V, E)$, параметрически зависящий от нормативного срока обучения T .

Множество вершин графа V представляет собой дисциплины и модули, которые в контексте новой модели высшего образования декомпозируются на три непересекающихся подмножества (рис. 1):

$$V = V_{\text{core}} \cup V_{\text{spec}}(T) \cup V_{\text{dig}},$$

где V_{core} — **инвариантное ядро**, состав которого фиксирован для всей укрупненной группы специальностей (УГС) и не зависит от T . Это обеспечивает требование единого образовательного пространства;



Рис. 1. Иерархическая структура ОПОП

$V_{\text{spec}}(T)$ — **вариативная профессиональная часть**, мощность и состав которой являются функциями от времени T . Именно этот компонент подлежит оптимизации для удовлетворения требований отраслевого заказчика;

V_{dig} — **цифровой кластер**, включающий модули ИТ-компетенций.

$$Q(P) = \sum_{k=1}^N w(r_k) \mu(P, r_k),$$

где $\mu(P, r_k) \in [0,1]$ — функция принадлежности, вычисляемая на основе семантического анализа содержания рабочих программ дисциплин методами NLP.

Математическая модель требований работодателя

Критическим отличием предлагаемого подхода является отказ от равнозначности требований. В условиях реализации Программы поддержки университетских комплексов РЖД до 2030 года требования стратегического партнера приобретают приоритетный статус.

Вводится вектор внешних требований $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$. Каждому требованию присваивается вес согласно функции приоритета (рис. 2):

$$w(r_k) = \begin{cases} \gamma, & \text{если } r_k \in R_{\text{RZD}}; \\ 1, & \text{если } r_k \in R_{\text{base}} / R_{\text{RZD}}, \end{cases}$$

где R_{RZD} — множество компетенций, детерминированных ОАО «РЖД» (например, эксплуатация высокоскоростных магистралей);

R_{base} — базовые требования ФГОС;

γ — коэффициент усиления ($\gamma > 1$), определяемый экспертным путем на этапе стратегического планирования.

Показатель качества покрытия требований $Q(P)$ для программы P рассчитывается как взвешенная сумма:

Алгоритм интеграции цифрового кластера

Интеграция модулей цифрового кластера в инженерные программы не может быть механической. Для исключения «лоскутной» цифровизации требуется применение алгоритма минимизации семантического разрыва.

Задача состоит в поиске такого подмножества ребер E_{new} , связывающих вершины цифрового кластера V_{dig} с профессиональными вершинами V_{spec} , которое максимизирует связность графа. Критерий оптимальности встраивания цифрового модуля v_{dig} (например, «Python для анализа данных») перед профильным модулем v_{spec} (например, «Моделирование транспортных потоков»):

$$\max \sum_{(v_{\text{dig}}, v_{\text{spec}}) \in E_{\text{new}}} \text{sim}(\text{vector}(v_{\text{dig}}), \text{vector}(v_{\text{spec}})),$$

где sim — косинусное сходство векторов, полученных с помощью модели TF-IDF на корпусе текстов учебно-методической документации. Это гарантирует, что ИТ-инструментарий изучается именно тогда, когда он необходим для решения прикладных задач специальности (рис. 3).

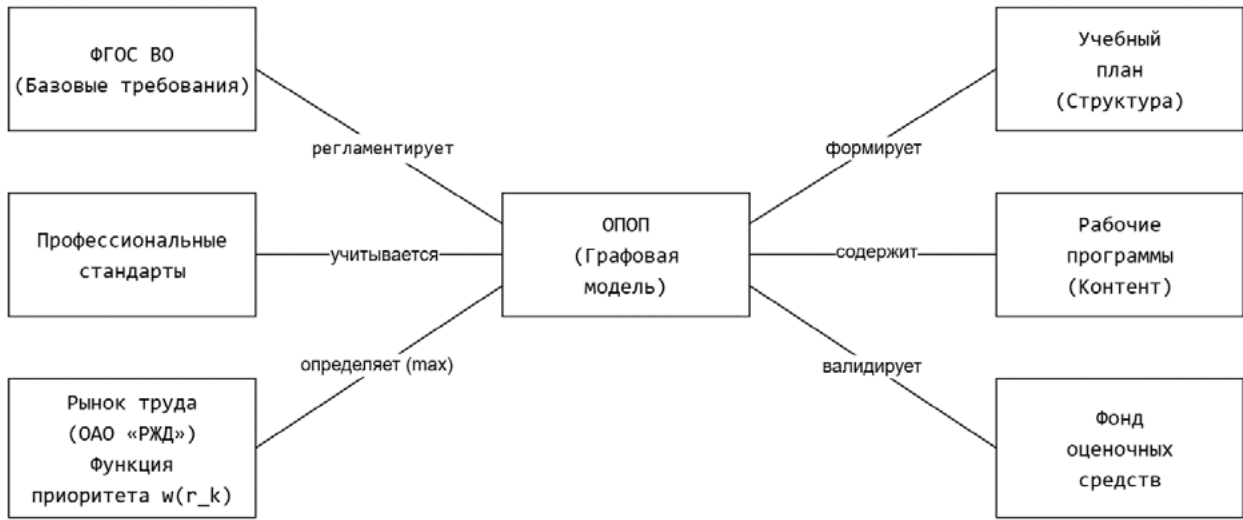


Рис. 2. Концептуальная модель влияния требований на структуру ОПОП

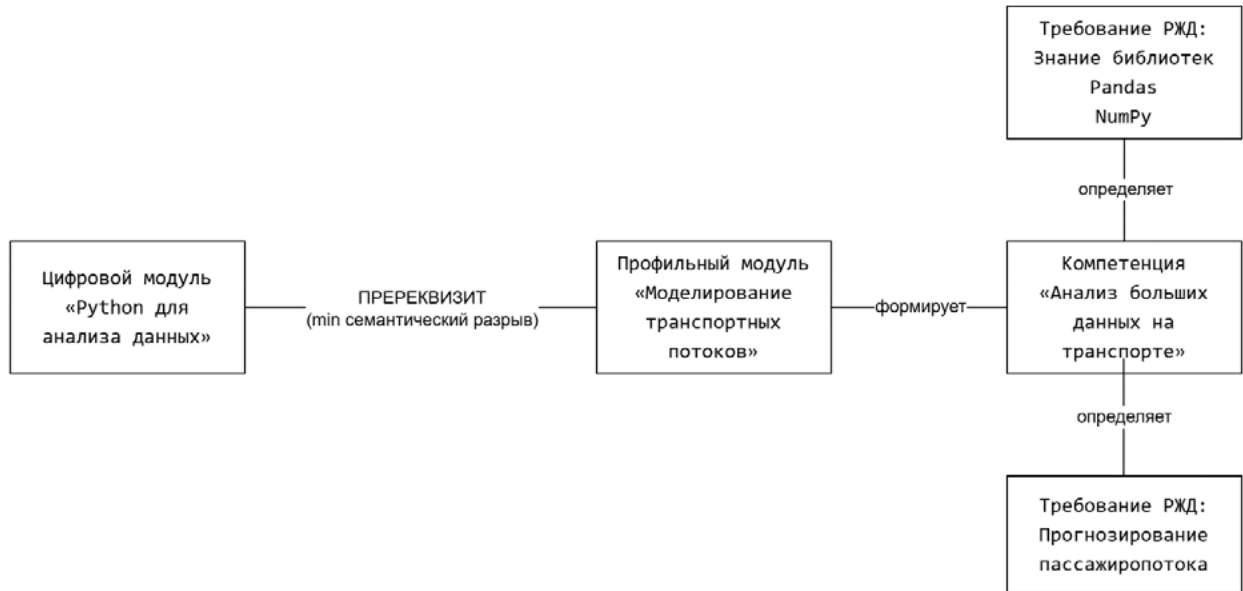


Рис. 3. Логика интеграции цифрового модуля в граф пререквизитов

Постановка задачи многокритериальной оптимизации

Переход на новую систему образования трансформируется в задачу дискретной оптимизации. Необходимо найти вектор управляющих параметров $X = (T, S)$, где $T \in \{4, 5, 6\}$ — срок обучения, а $S \subseteq V_{\text{спец}}$ — набор специализированных модулей.

Целевая функция:

$$F(X) = \alpha_1 Q(P) - \alpha_2 C(T) \rightarrow \max ,$$

где $C(T)$ — функция экономических и временных затрат;

α_1, α_2 — коэффициенты, отражающие стратегию вуза (баланс между качеством подготовки и сроком выхода специалиста на рынок труда). Система ограничений:

1. Ограничение трудоемкости. Суммарная нагрузка в зачетных единицах (ZET) не должна превышать норматив Z_{norm} в год:

$$\sum_{v \in P} z(v) \leq T \cdot 60.$$

- 2. Условие целостности ядра: $V_{\text{core}} \subset P$.
- 3. Топологическая сортировка.

Граф G_T не должен содержать циклов, и для любой вершины v сумма весов входящих дуг (пререквизитов) должна быть достаточной для освоения материала.

Решение данной задачи позволяет получить Парето-оптимальное множество структур образовательных программ, из которых лицо, принимающее решение (ЛПР), выбирает итоговый вариант: базовое (4 года) или специализированное (5–6 лет) образование.

Численный эксперимент и сценарный анализ структуры образовательных программ

Для проверки адекватности разработанной математической модели был проведен **вычислительный эксперимент по сценарному анализу** структуры образовательной программы. В качестве объекта моделирования выбрана специальность укрупненной группы 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта». Входной вектор требований R был сформирован путем агрегации ФГОС ВО и квалификационных требований ОАО «РЖД» (Программа до 2030 года), включая новые компетенции в области высокоскоростного движения и беспилотных систем.

Численный анализ ограничений модели. В рамках задачи многокритериальной оптимизации была исследована зависимость целевой функции качества $Q(P)$ от переменной срока обучения T при жестком ограничении на годовую трудоемкость ($z_{\text{year}} \leq 60 \text{ ZET}$).

Сценарий А ($T = 4$ года, «Базовое высшее»). При попытке уложить в граф $G_{T=4}$ инвариантное ядро V_{core} и полный набор профильных компетенций V_{spec} , требуемых работодателем, модель фиксирует **нарушение связности графа**. Либо суммарная трудоемкость превышает норматив ($\sum z > 240$), что ведет к перегрузке, либо приходится исключать критически важные модули цифрового кластера V_{dig} . Значение целевой функции $Q(P)$ в этом сценарии оказывается ниже допустимого порога, что интерпретируется как риск подготовки «недоученного» специалиста.

Сценарий Б ($T = 5 \dots 5,5$ лет, «Специализированное высшее»). Увеличение параметра T

расширяет допустимую область решений. Моделирование показало, что интеграция цифровых модулей (как пререквизитов) и специализированных дисциплин РЖД становится возможной без нарушения санитарных норм нагрузки. Функция $Q(P)$ достигает максимума в диапазоне 5,5 лет.

Интеграция цифрового кластера. Формальный анализ графа пререквизитов подтвердил гипотезу о том, что IT-модули (например, «Анализ больших данных на транспорте») не могут быть добавлены в программу произвольно. Алгоритм минимизации семантического разрыва определил их оптимальное положение на 2-м и 3-м курсах, до начала изучения специальных дисциплин по организации движения, что математически обосновывает необходимость фундаментальной цифровой подготовки перед профилизацией.

Заключение

В ходе исследования была решена актуальная научная задача формализации процессов проектирования ОПОП. Проведенный анализ показал, что традиционные эвристические подходы не обеспечивают необходимой адаптивности в условиях цифровой экономики.

Основным научным результатом исследования является **разработка комплексной математической модели**, представляющей образовательную программу как взвешенный ориентированный граф. В отличие от существующих подходов, данная модель впервые системно интегрирует внутреннюю структуру обучения (пререквизиты) с динамичными внешними требованиями рынка труда, формализованными методами интеллектуального анализа данных. Введение интегрального показателя качества позволяет перейти от субъективных экспертных оценок к **численной оптимизации** структуры ОПОП.

Практическая значимость работы заключается в создании инструментария для **доказательного проектирования**. Внедрение модели позволит вузам транспортной отрасли, таким как ПГУПС, минимизировать структурные ошибки в учебных планах и синхронизировать подготовку кадров

с реальными потребностями индустрии (в частности, в сферах беспилотных технологий).

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку численных методов оптимизации

предложенной графовой модели и их программную реализацию в виде системы поддержки принятия решений «ОПОП-Аналитик».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования: Указ Президента Российской Федерации от 12 мая 2023 г. № 343 (ред. от 26 июня 2023 года № 474).
2. Фальков В. Н. Новая модель высшего образования: нормативные подходы и сущностные элементы. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 2025. 17 с. URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/presentations/Present_new_model_high_education.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
3. Минтранс и РЖД утвердили совместную программу поддержки железнодорожных вузов // Министерство транспорта Российской Федерации: официальный сайт. 2025. 19 ноября. URL: <http://mintrans.gov.ru/press-center/news/12278> (дата обращения: 20.11.2025).
4. ПГУПС развивает цифровой кластер // Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. 2025. 17 ноября. URL: http://www.pgups.ru/news/science_and_innovation/pgups-razvivaet-sifrovoy-klaster/ (дата обращения: 20.11.2025).
5. Кузьмина Т. М., Ветрова О. А. Визуализация графов при разработке программы проверки знаний по теории графов // Научная визуализация. 2022. Т. 14, № 1. С. 41–49. DOI: 10.26583/sv.14.1.04.
6. Штагер Е. В., Бережнова Е. И. Принципы конструирования дидактического обеспечения базовых вузовских дисциплин // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 8. С. 235–239. DOI: 10.17513/snt.38810.
7. Сергеева Д. В., Баталов Д. И. Анализ математических подходов к моделированию ОПОП для кадрового обеспечения цифровой трансформации транспорта // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 68–76. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-68-76.
8. Воробьева Н. А., Носков С. И. Расчет основных параметров учебного плана с учетом междисциплинарных связей // Фундаментальные исследования. 2012. № 9. С. 894–898.
9. Ботов Д. С. Интеллектуальная поддержка формирования образовательных программ на основе нейросетевых моделей языка с учетом требований рынка труда // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 1. С. 5–19. DOI: 10.14529/ctcr190101.
10. Яруллин Д. В. Интеллектуальная система управления подготовкой ИТ-специалистов на основе денотативной аналитики // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 3. С. 141–164. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.3.08.
11. Escudero V., Liepmann H., Podjanin A. Using Online Vacancy and Job Applicants' Data to Study Skills Dynamics // Big Data Applications in Labor Economics, Part B. Research in Labor Economics. 2024. Vol. 52B. Pp. 35–99. DOI: 10.1108/S0147-91212024000052B023.
12. Бурсиан Е. Ю., Минеева Д. Д., Ушакова Т. И. Структурный принцип при осуществлении мониторинга преподавания дисциплин гуманитарного направления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 50–57. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-50-57.
13. Caena F., Redecker C. Aligning Teacher Competence Frameworks to 21st Century Challenges: The Case for the European Digital Competence Framework for Educators (DigCompEdu) // European Journal of Education. 2019. Vol. 54, Iss. 3. Pp. 356–369. DOI: 10.1111/ejed.12345.
14. Hervás-Torres M., Bellido-González M., Soto-Solier P. M. Digital Competences of University Students After Face-to-Face and Remote Teaching: Video-Animations Digital Create Content // Heliyon. 2024. Vol. 10, Iss. 11. Art. No. e32589. 11 p. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e32589.

15. Latif S., XianWen F., Wang L. Intelligent Decision Support System Approach for Predicting the Performance of Students Based on Three-Level Machine Learning Technique // Journal of Intelligent Systems. 2021. Vol. 30, No. 1. Pp. 739–749. DOI: 10.1515/jisys-2020-0065.

16. Баев А. В., Самонов А. В., Сафонов В. М. Методика проектирования автоматизированных систем управления специальными организационно-техническими системами // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 4 (35). 14 с. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.019.

Дата поступления: 23.11.2025

Решение о публикации: 26.11.2025

Mathematical Modelling and Multi-Criteria Optimization of the Educational Programme Structure in the Transport University in the Context of Transitioning to the National Higher Education Model

Daria V. Sergeeva

— Teaching Assistant of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: mathematical modelling, numerical methods and software suites. E-mail: dsergeeva@pgups.ru

Dmitry I. Batalov

— PhD in Engineering, Associate Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, big data processing, software robots, neural networks. E-mail: d.i.batalov@yandex.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Sergeeva D. V., Batalov D. I. Mathematical Modelling and Multi-Criteria Optimization of the Educational Programme Structure in the Transport University in the Context of Transitioning to the National Higher Education Model. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 79–88. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-79-88. (In Russian)

Abstract. Purpose: to eliminate the methodological gap between the evolving needs of the labour market particularly in light of the digital transformation in transportation and the slow-moving processes associated with the development of major professional educational programmes (MPEP). **Methods:** various existing approaches to modelling MPEP have been systematically analyzed and classified. The structure of the programme has been formalized through graph theory, while intelligent data analysis techniques have been applied to assess and process the demands of employers. **Results:** the study reveals the limitations associated with both expert and ontological approaches when dealing with large arrays of labor market data. A novel mathematical model of the MPEP has been formulated as a weighted directed graph $G = (V, E)$, where the vertices integrate various disciplines, competencies, and employer requirements, including professional standard and job vacancies. Furthermore, an innovative integral indicator for programme quality is introduced, derived from an additive convolution of criteria assessing the completeness of competency coverage and the graph connectivity. **Practical significance:** the proposed model and algorithms establish a foundation for an automated decision support system. This system aims to minimize the adaptation time of educational programmes to the demands of high-tech sectors, such as unmanned transportation and digital logistics, thereby facilitating a shift towards evidence-based management of education.

Keywords: mathematical modelling, educational programme, oriented graph, data mining, digital transformation of transport, integral quality indicator, decision support system

REFERENCES

1. O nekotorykh voprosakh sovershenstvovaniya sistemy vysshego obrazovaniya [On Certain Issues of Improving the Higher Education System]: Decree of the President of the Russian Federation No. 343 dated May 12, 2023 (as amended on June 26, 2023 No. 474). (In Russian)
2. Falkov V. N. Novaya model vysshego obrazovaniya: normativnye podkhody i sushchnostnye elementy [New Model of Higher Education: Regulatory Approaches and Essential Elements]. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 2025, 17 p. Available at: http://fgosvo.ru/uploadfiles/presentations/Present_new_model_high_education.pdf (accessed: November 20, 2025). (In Russian)
3. Mintrans i RZhD utverdili sovmestnuyu programmu podderzhki zheleznodorozhnykh vuzov [The Ministry of Transport and Russian Railways approved a joint program to support railway universities], *Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii: ofitsialnyy sayt* [Ministry of Transport of the Russian Federation: Official Internet Resource]. Published online at November 19, 2025. Available at: <http://mintrans.gov.ru/press-center/news/12278> (accessed: November 20, 2025). (In Russian)
4. PGUPS razvivaet tsifrovoy klaster [PGUPS is developing a digital cluster], *Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I* [Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]. Published online at November 17, 2025. Available at: http://www.pgups.ru/news/science_and_innovation/pgups-razvivaet-tsifrovoy-klaster/ (accessed: November 20, 2025). (In Russian)
5. Kuzmina T. M., Vetrova O. A. Graph Visualization in the Development of the Knowledge Testing Program on Graph Theory, *Scientific Visualization*, 2022, Vol. 14, No. 1, Pp. 41–49, DOI: 10.26583/sv.14.1.04
6. Shtager E. V., Berezhnova E. I. Printsipy konstruirovaniya didakticheskogo obespecheniya bazovykh vuzovskikh distsiplin [Design's Principles of Didactic Provision of Basic University Disciplines], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2021, No. 8, Pp. 235–239. DOI: 10.17513/snt.38810. (In Russian)
7. Sergeeva D. V., Batalov D. I. Analiz matematicheskikh podkhodov k modelirovaniyu OPOP dlya kadrovogo obespecheniya tsifrovoy transformatsii transporta [Mathematical Approaches to Modelling Basic Professional Education Programmes for Personnel Support of Transport Digital Transformation], *Intellektualnye tekhnologii na transporte* [Intellectual Technologies on Transport], 2025, No. 3 (43), Pp. 68–76. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-68-76. (In Russian)
8. Vorobyeva N. A., Noskov S. I. Raschet osnovnykh parametrov uchebnogo plana s uchetom mezhdistsiplinarnykh svyazey [University Curriculum Parameters Calculation with Logical Dependences Between Courses], *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2012, No. 9, Pp. 894–898. (In Russian)
9. Botov D. S. Intellektualnaya podderzhka formirovaniya obrazovatelnykh programm na osnove neyrosetevykh modeley yazyka s uchetom trebovaniy rynka truda [Intelligent Support Development of Educational Programs Based on the Neural Language Models Taking into Account of the Labor Market Requirements], *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika"* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics"], 2019, Vol. 19, No. 1, Pp. 5–19. DOI: 10.14529/ctcr190101. (In Russian)
10. Yarullin D. V. Intellektualnaya sistema upravleniya podgotovkoy IT-spetsialistov na osnove denotativnoy analitiki [Intelligent Control System for IT Specialists Training Based on Denotative Analytics], *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied Mathematics and Control Sciences], 2022, No. 3, Pp. 141–164. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.3.08. (In Russian)
11. Escudero V., Liepmann H., Podjanin A. Using Online Vacancy and Job Applicants' Data to Study Skills Dynamics, *Big Data Applications in Labor Economics, Part B. Research in Labor Economics*, 2024, Vol. 52B, Pp. 35–99. DOI: 10.1108/S0147-91212024000052B023.
12. Bursian E. Yu., Mineeva D. D., Ushakova T. I. Strukturnyy printsip pri osushchestvlenii monitoringa prepodavaniya distsiplin gumanitarnogo napravleniya [The Structural Principle for Monitoring the Teaching of Humanities Disciplines],

Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport], 2025, No. 2 (42), Pp. 50–57. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-50-57. (In Russian)

13. Caena F., Redecker C. Aligning Teacher Competence Frameworks to 21st Century Challenges: The Case for the European Digital Competence Framework for Educators (DigCompEdu), *European Journal of Education*, 2019, Vol. 54, Iss. 3, Pp. 356–369. DOI: 10.1111/ejed.12345.

14. Hervás-Torres M., Bellido-González M., Soto-Solier P. M. Digital Competences of University Students After Face-to-Face and Remote Teaching: Video-Animations Digital Create Content, *Heliyon*, 2024, Vol. 10, Iss. 11, Art. No. e32589, 11 p. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e32589.

15. Latif S., XianWen F., Wang L. Intelligent Decision Support System Approach for Predicting the Performance of Students Based on Three-Level Machine Learning Technique, *Journal of Intelligent Systems*, 2021, Vol. 30, No. 1, Pp. 739–749. DOI: 10.1515/jisys-2020-0065.

16. Baev A. V., Samonov A. V., Safonov V. M. Metodika proektirovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya spetsialnymi organizatsionno-tekhnicheskimi sistemami [Methodology of Designing Automated Control System for Special Organization and Technical Systems], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii [Modeling, Optimization and Information Technology]*, 2021, Vol. 9, No. 4 (35), 14 p. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.019. (In Russian)

Received: 23.11.2025

Accepted: 26.11.2025

УДК 656.073

Практическое сравнение методов компьютерного зрения и глубокого обучения в задаче бинарной классификации изображений

- Лохвицкий Владимир Александрович** — д-р техн. наук, заместитель начальника кафедры математического и программного обеспечения специальных космических комплексов, доцент. Научные интересы: системы массового обслуживания, разработка безопасного программного обеспечения. E-mail: lokhy_va@mail.ru
- Яковлев Евгений Леонидович** — канд. техн. наук, доцент кафедры математического и программного обеспечения специальных космических комплексов. Научные интересы: системы искусственного интеллекта, системы управления БПЛА. E-mail: 79112249163@ya.ru
- Бушев Илья Владимирович** — курсант 5-го курса направления 09.05.01 «Программное и математическое обеспечение систем управления летательными аппаратами». Научные интересы: цифровая обработка изображений, машинное обучение, геоинформационные системы. E-mail: bushev-ilya123@mail.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Лохвицкий В. А., Яковлев Е. Л., Бушев И. В. Практическое сравнение методов компьютерного зрения и глубокого обучения в задаче бинарной классификации изображений // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 89–98. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-89-98

Аннотация. Задачи бинарной классификации изображений широко применяются в инженерных и производственных системах, включая автоматизированный контроль, техническое зрение и мониторинг объектов. При усложнении условий съемки и увеличении объемов данных возникает необходимость сравнения классических алгоритмов компьютерного зрения и нейросетевых методов глубокого обучения с целью выбора оптимального. **Цель:** провести практическое сравнение эффективности классического алгоритма обработки изображений и нейросетевой модели YOLO при решении задачи бинарной классификации. **Методы:** традиционная обработка изображений на основе пороговой фильтрации, морфологических операций и анализа геометрических признаков, а также модель детекции YOLO, обученная на размеченной выборке. **Результаты:** классический алгоритм показал высокую скорость обработки и достаточную точность при стабильном освещении, однако продемонстрировал значительное падение качества при изменении условий съемки. Модель YOLO обеспечила более высокие показатели точности, устойчивость к фотометрическим и геометрическим вариациям, а также стабильную работу при наличии дополнительных шумов. **Практическая значимость:** результаты могут быть использованы при проектировании систем компьютерного зрения, выборе оптимального алгоритма под конкретные условия эксплуатации, а также создании гибридных систем, объединяющих преимущества классических и нейросетевых методов. **Обсуждение:** исследование подтверждает, что классические методы эффективно работают в условиях ограниченных ресурсов, но чувствительны к внешним факторам. Нейросетевые подходы, напротив, обеспечивают высокую обобщающую способность и устойчивость, что делает их предпочтительными при нестабильных условиях съемки. Новизна работы заключается в сравнении методов в идентичных условиях обработки с акцентом на практические показатели, что позволяет объективно оценить область применения каждого подхода.

Ключевые слова: компьютерное зрение, глубокое обучение, YOLO, бинарная классификация, анализ изображений, обработка изображений, нейросетевые методы

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки); **1.2.2** — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); **2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Введение

С развитием технологий машинного обучения, а также с ростом вычислительных мощностей значительное внимание стало уделяться сравнительному анализу методов компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов для решения задач обработки изображений [1]. Методы компьютерного зрения (Computer Vision, CV), такие как пороговая бинаризация и морфологическая обработка, долгое время использовались для задач, связанных с распознаванием объектов и анализом визуальной информации [2].

С увеличением объемов данных и усложнением условий съемки возникла необходимость сопоставить эффективность классических и нейросетевых методов, чтобы определить, при каких условиях каждый из них показывает лучшие результаты.

Одной из ключевых задач, решаемых с помощью указанных подходов, является бинарная классификация изображений — определение наличия или отсутствия заданного признака. Традиционные методы, основанные на пороговой обработке и морфологических операциях, остаются востребованными при ограниченных вычислительных ресурсах и стабильных условиях съемки. Однако при наличии внешних факторов — неравномерное освещение, смещение камеры, шум — их точность значительно снижается, что ставит вопрос о целесообразности применения адаптивных нейросетевых решений в условиях нестабильной съемки.

В ряде современных исследований подробно рассматриваются различия между классическими и нейросетевыми подходами.

Так, в [3] проведен сравнительный анализ методов глубокого обучения и традиционных алгоритмов компьютерного зрения в задачах идентификации дефектов. Авторы показали, что сверточные нейронные сети обеспечивают более высокую точность и автоматическую адаптацию к условиям съемки, тогда как классические алгоритмы требуют ручной настройки параметров. При этом подчеркивается, что методы глубокого обучения предъявляют повышенные требования к объему данных и вычислительным ресурсам.

В [4] рассмотрены методы и алгоритмы компьютерного зрения на основе сверточных и рекуррентных нейронных сетей. Автор отмечает, что традиционные алгоритмы, включая алгоритм Виолы — Джонса и методы на основе признаков Хаара, показывают хорошие результаты при идеализированных условиях, но теряют эффективность при изменении ракурса или освещения. Напротив, нейросетевые архитектуры, такие как YOLO, R-CNN и SSD, обеспечивают обработку изображений в реальном времени и сохраняют высокую точность при сложных условиях съемки, что делает их предпочтительными в интеллектуальных системах распознавания.

В [5] приведен обзор современных методов машинного обучения, включая контролируемое и глубокое обучение. Отмечено, что нейросетевые модели обеспечивают более высокую обобщающую способность за счет автоматического выделения признаков и нелинейного представления данных. Однако автор также указывает на проблему интерпретируемости таких моделей и необходимость большого количества размеченных данных для их обучения, что ограничивает их применение в некоторых инженерных задачах.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области нейронных сетей, выбор между классическими и нейросетевыми методами обработки изображений остается актуальной задачей. Особенно важным является экспериментальное сравнение указанных подходов по критериям точности, устойчивости к внешним факторам и вычислительной эффективности. В рамках настоящей работы проводится практический анализ двух подходов — классического метода обработки изображений на основе пороговой бинаризации и морфологических операций и модели YOLO. Сравнение осуществляется по показателям точности, устойчивости к изменениям освещенности и времени обработки изображений.

Материалы и методы

Рассматривается задача бинарной классификации изображений, в рамках которой необходимо

определить принадлежность входного изображения I к одному из двух классов: наличие или отсутствие целевого объекта. Для решения задачи анализируются два подхода — классический алгоритм компьютерного зрения, основанный на пороговой бинаризации и морфологических операциях, и нейросетевая модель YOLO, обученная на размеченных данных.

Дано:

1. Входное изображение:

$$I \in \mathbb{R}^{H \times W \times C},$$

где H — количество пикселей по вертикали;

W — количество пикселей по горизонтали;

C — количество цветовых каналов.

2. Для классического подхода используется функция предобработки:

$$F_{cv}(I) = B(I, T),$$

где $B(I, T)$ — бинаризованное изображение, полученное по порогу T .

Порог T выбирается эмпирически и определяет чувствительность алгоритма к изменениям яркости. После бинаризации применяются морфологические операции для устранения шумов и выделения ключевых областей.

3. Для нейросетевого подхода используется обученная модель

$$F_{yolo}(I; \theta),$$

где θ — набор параметров нейронной сети, определяющий ее способность выделять и классифицировать объекты на изображении.

4. Результатом работы модели является вектор вероятностей:

$$P = \{p_0, p_1\}, \quad p_0 + p_1 = 1,$$

где p_1 — вероятность наличия целевого объекта на изображении;

p_0 — вероятность отсутствия целевого объекта на изображении.

Требуется определить:

1. Класс изображения:

$$y = \arg \max_{k \in \{0,1\}} P_k,$$

где $y = 1$ — объект присутствует;

$y = 0$ — объект отсутствует.

2. Метрики качества работы методов:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN},$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP},$$

где TP, TN, FP, FN — числа истинно и ложно классифицированных изображений;

Accuracy — общая точность;

Precision — точность положительных срабатываний;

Recall — доля реально существующих объектов, которые выявил алгоритм.

3. Оценить влияние внешних факторов на качество классификации каждого подхода.

Методы исследования

Предлагаемый сравнительный анализ реализует два независимых алгоритма обработки изображений, направленных на решение задачи бинарной классификации:

1. Классический алгоритм компьютерного зрения, основанный на пороговой бинаризации и морфологических операциях.

2. Нейросетевой алгоритм на основе архитектуры YOLO.

Оба подхода обеспечивают определение принадлежности изображения к классу «объект присутствует/отсутствует», но используют принципиально различные способы извлечения признаков и принятия решения.

Классический алгоритм компьютерного зрения

Алгоритм основан на последовательной обработке изображения с применением базовых методов цифровой обработки и морфологического анализа. Он включает следующие ключевые этапы:

1. Предобработка изображений: изображение $I(x, y)$ приводится к оттенкам серого и нормализуется [6]:

$$I_g(x, y) = 0,299R(x, y) + 0,587G(x, y) + 0,114B(x, y),$$

где R, G, B — значения каналов в координате (x, y) .

Далее применяется фильтрация для подавления шумов. Используется, например, гауссов фильтр:

$$I_f(x, y) = G_y * I_g(x, y),$$

где G_y — двумерное гауссово ядро с дисперсией σ ; $*$ — операция свертки.

2. Пороговая бинаризация: для выделения областей интереса применяется операция пороговой бинаризации [7]:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } I_f(x, y) > T; \\ 0, & \text{если } I_f(x, y) \leq T, \end{cases}$$

где порог T выбирается эмпирически и определяет чувствительность к изменению яркости.

3. Морфологическая обработка: применяется для удаления и объединения смежных участков [8]:

$$B'(x, y) = D(E(B(x, y))),$$

где $E(\cdot)$ — операция эрозии;

$B(\cdot)$ — операция дилатации.

4. Извлечение признаков и классификация: из бинарной маски вычисляются геометрические характеристики: площадь S , периметр P , соотношение сторон, компактность и т. д. На основе этих признаков определяется наличие или отсутствие объекта:

$$y_{cv} = \begin{cases} 1, & \text{если } S > S_{min} \wedge P > P_{min}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Нейросетевой алгоритм

Нейросетевая модель YOLO представляет собой архитектуру сверточной нейронной сети, выполняющую детекцию и классификацию объектов в едином проходе изображения. Алгоритм включает следующие этапы:

1. Подготовка данных: исходные изображения приводятся к фиксированному размеру 416×416 пикселей и нормализуются в диапазон $[0, 1]$:

$$I_n(x, y, c) = \frac{255}{I(x, y, c)}.$$

Для обучения формируется размеченная выборка

$$\{(I_i, y_i)\}_{i=1}^N,$$

где $y_i \in \{0, 1\}$ — метка класса для изображения I_i .

2. Архитектура и обучение: YOLO делит изображение на сетку размером $S \times S$, для каждой ячейки предсказывает наличие объекта и параметры ограничивающего прямоугольника. Функция потерь описывается выражением:

$$L = \lambda_{\text{coord}} \sum_{i=0}^{S^2} \left[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] + \lambda_{\text{obj}} \sum_{i=0}^{S^2} (C_i - \hat{C}_i)^2 + \lambda_{\text{cls}} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{c \in \text{classes}} (p_i(c) - \hat{p}_i(c))^2,$$

где (x_i, y_i) — координаты центра объекта;

C_i — вероятность наличия объекта в ячейке;

$p_i(c)$ — вероятность принадлежности к классу C ;

$\lambda_{\text{coord}}, \lambda_{\text{obj}}, \lambda_{\text{cls}}$ — весовые коэффициенты ошибок.

3. Распознавание: после обучения модель принимает изображение I и выдает вектор вероятностей:

$$P = F_{\text{yolo}}(I; \theta) = \{p_0, p_1\},$$

где θ — обученные веса сети.

Класс определяется следующим образом:

$$y_{\text{yolo}} = \arg \max_{k \in \{0, 1\}} p_k.$$

Для повышения точности применяется процедура подавления немаксимальных значений (Non-Maximum Suppression, NMS), устраняющая дублирующиеся предсказания.

Сравнительный анализ

Для объективной оценки эффективности методов выполняется сравнение по трем ключевым критериям:

- точность классификации — по метрике Accuracy;
- устойчивость к внешним воздействиям — при варьировании освещенности, угла наклона и уровня шума;
- время обработки одного изображения, определяемое экспериментально.

Сравнение производится на идентичном наборе изображений, что обеспечивает равные условия для обоих алгоритмов.

Реализация и экспериментальная часть

Для реализации и последующего сравнения был разработан программный комплекс с графическим интерфейсом, построенный по модульной архитектуре [9]. Каждый модуль решает специализированную задачу, обеспечивая последовательное выполнение операций — от загрузки изображений до анализа и визуализации результатов (табл. 1). Такое построение отражает принципы модульности и воспроизводимости экспериментов, что позволяет выполнять корректное сравнение алгоритмов в идентичных условиях [10].

Система реализована в виде набора модулей, каждый из которых выполняет строго определенные функции. Такое разделение обеспечивает независимость компонентов, возможность последующего расширения функционала и удобство тестирования.

Для проверки теоретических положений, описанных ранее, была проведена практическая оценка эффективности двух подходов — классического и нейросетевого [15].

Тестирование проводилось на едином наборе изображений при идентичных условиях обработки. Для обеих систем использовались одинаковые параметры предобработки и фиксированный размер входного кадра. Метрики качества вычислялись на тестовой части выборки по стандартным формулам, принятым в задачах бинарной классификации [16]. Основное внимание уделялось трем группам характеристик:

1. Качественные показатели: Accuracy, Precision, Recall.
2. Производительность и вычислительная эффективность: время обработки, FPS.
3. Устойчивость к внешним факторам: изменения освещенности, шум, геометрические искажения.

Для оценки точности классификации были вычислены основные показатели качества — Accuracy, Precision, Recall и F1 [7]. Результаты сравнения эффективности двух подходов представлены в табл. 2.

Классический алгоритм демонстрирует стабильность при контролируемом освещении, однако при снижении контрастности теряет часть истинных срабатываний. Нейросетевая модель, напротив, сохраняет высокие значения метрик за

Таблица 1

Основные этапы работы программного комплекса

Этап	Описание	Используемые инструменты
Загрузка изображений	Импорт входных изображений и приведение их к унифицированному формату	OpenCV [11], NumPy [12]
Предобработка	Конвертация в оттенки серого, фильтрация шумов, нормализация размеров	OpenCV
Анализ методом CV	Пороговая бинаризация и морфологические операции для выделения областей интереса	OpenCV
Анализ методом YOLO	Обработка изображений обученной нейросетевой моделью YOLO, получение вероятностных карт	PyTorch [13], Ultralytics
Сравнение результатов	Расчет метрик точности, полноты и времени обработки	NumPy, time
Визуализация	Отображение исходных и результирующих изображений, построение графиков	PyQt5, Matplotlib [14]

Таблица 2

Результаты оценки качества классификации

Метрика	CV	YOLO
Accuracy	0,87	0,98
Precision	0,82	0,97
Recall	0,79	0,98
F1	0,80	0,97

счет обучения на аугментированных данных и способности обобщать признаки.

Скорость обработки изображений является ключевым параметром при внедрении систем реального времени. Для количественной оценки производительности обоих методов были проведены измерения времени обработки кадров и загрузки вычислительных ресурсов (табл. 3). Эксперименты выполнялись на едином аппаратном стенде: CPU Intel Core i7-12700H, 16 GB RAM, GPU RTX 3070 Ti.

Как следует из табл. 3, классический метод выигрывает по скорости на CPU-платформах, однако YOLO демонстрирует стабильную производительность при использовании GPU, обеспечивая обработку кадров в режиме, близком к реальному времени.

Для анализа устойчивости алгоритмов к внешним воздействиям были сформированы дополнительные тест-наборы с варьированием условий: изменение освещенности, добавление гауссова шума и поворот изображения. Результаты измерений точности при различных сценариях приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, CV-метод значительно чувствительнее к изменению освещенности и шуму, поскольку основан на фиксированных порогах яркости. YOLO демонстрирует высокую устойчивость за счет обученных сверточных фильтров и встроенных аугментаций, обеспечивающих инвариантность к фотометрическим и геометрическим вариациям.

Проведенные испытания подтвердили, что нейросетевой подход обеспечивает более высокую точность, полноту и устойчивость при разнообразных условиях съемки. Классические методы, в свою очередь, сохраняют актуальность в системах с ограниченными вычислительными ресурсами, где приоритетом являются высокая скорость обработки и простота интерпретации решений.

Таким образом, выбор подхода определяется балансом между требуемой точностью, ресурсными возможностями и характером решаемой задачи. В случаях, когда важна объяснимость алгоритма и минимальная нагрузка на процессор, предпочтителен классический метод. При необходимости высокой точности и устойчивости к внешним факторам оптимальным выбором является использование нейросетевой модели YOLO.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что выбор метода анализа изображений определяется сочетанием факторов — требуемой точности, устойчивости к внешним воздействиям и доступных вычислительных ресурсов. Реализованный программный комплекс позволил выполнить корректное сравнение двух подходов — классического алгоритма компьютерного зрения и нейросетевой модели YOLO — в идентичных условиях обработки.

Результаты экспериментов показали, что классический метод, основанный на пороговой бина-

Таблица 3

Сравнение производительности алгоритмов

Показатель	CV	YOLO	Примечание
Среднее время на кадр, мс	4,6	11,3	YOLO выполняет больше вычислений
FPS, кадров/с	217	88	CV в 2,4 раза быстрее
Использование CPU/GPU	CPU 100 %	GPU 35 % / CPU 20 %	YOLO эффективно распараллеливается
Память, МБ	85	312	Весы модели и активации

Таблица 4

Сравнение производительности алгоритмов

Условие	CV — Accuracy	YOLO — Accuracy	ΔAcc (CV)	ΔAcc (YOLO)
Базовый набор	0,87	0,98	—	—
Освещенность ± 20 %	0,74	0,96	-0,13	-0,02
Шум ($\sigma = 10$)	0,71	0,95	-0,16	-0,03
Поворот $\pm 10^\circ$	0,77	0,97	-0,10	-0,01

ризации и морфологических операциях, обладает высокой скоростью обработки и простотой реализации, что делает его эффективным инструментом при стабильных условиях съемки и ограниченных ресурсах вычислительной системы. Однако его точность снижается при изменении освещенности, наличии шумов и геометрических искажениях изображения.

Нейросетевая модель YOLO, напротив, демонстрирует более высокие показатели точности, полноты и устойчивости к вариациям входных данных за счет обучаемых признаков и способности к адаптации, но предъявляет повышенные требования к объему обучающих данных и использованию графических ускорителей. Полученные результаты не свидетельствуют об абсолютном превосходстве одного подхода над другим, а от-

ражают различие в приоритетах: классические алгоритмы обеспечивают лучшую скорость и простоту настройки, тогда как нейросетевые методы — устойчивость и точность. На практике целесообразно выбирать метод с учетом особенностей задачи, вычислительных ресурсов и требований к интерпретируемости.

В перспективе результаты исследования могут быть использованы для разработки гибридных систем, объединяющих преимущества обоих подходов [17]. Такие решения позволят реализовать адаптивную обработку изображений, при которой предварительная фильтрация выполняется классическими методами, а уточняющая классификация — с использованием нейронных сетей, обеспечивая баланс между точностью и вычислительной эффективностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сеничев А. В., Новикова А. И., Васильев П. В. Сравнение глубокого обучения с традиционными методами компьютерного зрения в задачах идентификации дефектов // Молодой исследователь Дона. 2020. № 4 (25). С. 64–67.
2. Полковникова Н. А. Исследование методов и алгоритмов компьютерного зрения на основе сверточных и рекуррентных нейронных сетей // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 3 (96). С. 154–168. DOI: 10.34046/aumsuomt96/21.
3. Саксонов П. В., Бауман А. А. Обзор методов машинного обучения // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы XII Международной научно-практической конференции (Междуреченск, Россия, 26 апреля 2023 г.). Междуреченск: Кузбасский гос. технический ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2023. С. 444–1–444-6.
4. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е. Цифровая обработка изображений = Digital Image Processing. Third Edition / пер. с англ. Л. И. Рубанова и П. А. Чочиа. 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
5. Сеничев А. В., Новиков С. С. Методы компьютерного зрения и их применение в анализе изображений. М.: ИПРАН РАН, 2020. 142 с.
6. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. Sebastopol (CA): O'Reilly Media, 2008. 575 p.
7. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement // ArXiv. 2018. Vol. 1804.02767. 6 p. DOI: 10.48550/arXiv.1804.02767.
8. Caballar R. D., Stryker C. What is Computer Vision? URL: <http://www.ibm.com/think/topics/computer-vision> (дата обращения: 07.11.2025).
9. Patel M. The Complete Guide to Image Preprocessing Techniques in Python. URL: <http://readmedium.com/the-complete-guide-to-image-preprocessing-techniques-in-python-dca30804550c> (дата обращения: 07.11.2025).
10. Thresholding (Image Processing) // Wikipedia. Last update 12 November 2025. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding_\(image_processing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding_(image_processing)) (дата обращения: 16.11.2025).
11. Mathematical Morphology // Wikipedia. Last update 08 November 2025. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_morphology (дата обращения: 16.11.2025).
12. Bradski G. The OpenCV Library // Dr. Dobb's Journal Software Tools. 2000. Vol. 25, Iss. 11. Pp. 120–125.

13. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library / A. Paszke, S. Gross, F. Massa [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems 32: Proceeding of the 33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019), (Vancouver, Canada, 08–14 December 2019). NeurIPS Foundation, 2019. Pp. 8024–8035.

14. Hunter J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment // Computing in Science and Engineering, 2007. Vol. 9, Iss. 3. Pp. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.

15. Turay T., Vladimirova T. Toward Performing Image Classification and Object Detection with Convolutional Neural Networks in Autonomous Driving Systems: A Survey // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 14076–14119. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3147495.

16. Powers D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation // Journal of Machine Learning Technologies. 2011. Vol. 2, Iss. 1. Pp. 37–63.

17. Клетге Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы = Concise Computer Vision. An Introduction into Theory and Algorithms / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2019. 506 с.

Дата поступления: 20.11.2025

Решение о публикации: 25.11.2025

Practical Comparison of Computer Vision and Deep Learning Methods for the Binary Image Classification Task

Vladimir A. Lokhvitsky — Dr. Sci. in Engineering, Deputy Head of the Department of Mathematics and Software for Special Space Complexes, Associate Professor. Research interests: queuing systems, secure software development. E-mail: lokhv_va@mail.ru

Evgeny L. Yakovlev — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mathematics and Software for Special Space Complexes. Research interests: artificial intelligence systems, UAV control systems. E-mail: 79112249163@ya.ru

Ilya V. Bushev — 5th year Student Majoring in 09.05.01 Software and Mathematical Support for Aircraft Control Systems. Research interests: digital image processing, machine learning, geographic information systems. E-mail: bushev-ilya123@mail.ru

Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

For citation: Lokhvitsky V. A., Yakovlev E. L., Bushev I. V. Practical Comparison of Computer Vision and Deep Learning Methods for the Binary Image Classification Task. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 89–98. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-89-98. (In Russian)

Abstract. *Binary image classification tasks are widely employed in engineering and manufacturing systems, including automated control, machine vision, and object monitoring. As the complexity of imaging conditions increases and data volumes expand, it becomes essential to evaluate classical computer vision algorithms alongside deep learning neural network methods to identify the most effective method. **Purpose:** to perform a practical comparison of the effectiveness of a traditional image processing algorithm and the YOLO neural network model for addressing the binary classification challenge. **Methods:** traditional image processing techniques, including threshold filtering, morphological operations, and geometric feature analysis, as well as the YOLO detection model trained on a labeled dataset. **Results:** the classical algorithm has demonstrated high processing speed and adequate accuracy under stable lighting conditions; however, it has exhibited a pronounced decline in performance when imaging conditions changed. In contrast, the YOLO model has demonstrated enhanced accuracy, resilience to both photometric and geometric variations, and consistent performance even in the presence of extraneous noise. **Practical significance:** the results can guide the development of computer vision systems, aid in the selection of the optimal algorithm for specific operational scenarios, and*

facilitate the creation of hybrid systems that combine the strengths of both traditional and neural network methods. **Discussion:** this study confirms that while traditional methods are effective in resource-constrained environments, they are vulnerable to external influences. Conversely, neural network approaches offer superior generalization and stability, making them more advantageous in fluctuating imaging conditions. The novelty of the research lies in the comparative analysis of these methods under identical processing parameters, with a particular focus on practical indicators. This approach facilitates an objective assessment of the applicability domain inherent to each method.

Keywords: computer vision, deep learning, YOLO, binary classification, image analysis, image processing, neural network methods

REFERENCES

1. Senichev A. V., Novikova A. I., Vasilyev P. V. Sravnenie glubokogo obucheniya s traditsionnymi metodami kompyuternogo zreniya v zadachakh identifikatsii defektov [Comparison of Deep Learning with Traditional Methods of Computer Vision in the Problems of Defects Identification], *Molodoy issledovatel Dona [Young Researcher of Don]*, 2020, No. 4 (25), Pp. 64–67. (In Russian)
2. Polkovnikova N. A. Issledovanie metodov i algoritmov kompyuternogo zreniya na osnove svertochnykh i rekurrentnykh neyronnykh setey [Research of Methods and Algorithms of Computer Vision Based on Convolutional and Recurrent Neural Networks], *Ekspluatatsiya morskogo transporta [Marine Transport Operation]*, 2020, No. 3 (96), Pp. 154–168. DOI: 10.34046/aumsuomt96/21. (In Russian)
3. Saksonov P. V., Bauman A. A. Obzor metodov mashinnogo obucheniya [Overview of Machine Learning Methods], *Sovremennye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve: materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Modern Trends and Innovations in Science and Production: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference (Mezhdurechensk, Russia, April 26, 2023)]*, Mezhdurechensk, Russia, April 26, 2023. Mezhdurechensk, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2023. Pp. 444-1–444-6. (In Russian)
4. Gonzalez R. C., Woods R. E. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing. Third Edition]. Moscow, Tekhnosfera Publishing House, 2012, 1104 p. (In Russian)
5. Senichev A. V., Novikov S. S. Metody kompyuternogo zreniya i ikh primeneniye v analize izobrazheniy [Computer vision methods and their application in image analysis]. Moscow, Institute for the Study of Science of the RAS, 2020, 142 p. (In Russian)
6. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. Sebastopol (CA), O'Reilly Media, 2008, 575 p.
7. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement, *ArXiv*, 2018, Vol. 1804.02767, 6 p. DOI: 10.48550/arXiv.1804.02767.
8. Caballar R. D., Stryker C. What is Computer Vision? Available at: <http://www.ibm.com/think/topics/computer-vision> (accessed: November 07, 2025).
9. Patel M. The Complete Guide to Image Preprocessing Techniques in Python. Available at: <http://readmedium.com/the-complete-guide-to-image-preprocessing-techniques-in-python-dca30804550c> (accessed: November 07, 2025).
10. Thresholding (Image Processing), *Wikipedia*. Last update November 12, 2025. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding_\(image_processing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding_(image_processing)) (accessed: November 16, 2025).
11. Mathematical Morphology, *Wikipedia*. Last update November 08, 2025. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_morphology (accessed: November 16, 2025).
12. Bradski G. The OpenCV Library, *Dr. Dobb's Journal Software Tools*, 2000, Vol. 25, Iss. 11, Pp. 120–125.
13. Paszke A., Gross S., Massa F., et al. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library, *Advances in Neural Information Processing Systems 32: Proceeding of the 33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019)*, Vancouver, Canada, December 08–14, 2019. NeurIPS Foundation, 2019. Pp. 8024–8035.

14. Hunter J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment, *Computing in Science and Engineering*, 2007, Vol. 9, Iss. 3. Pp. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.

15. Turay T., Vladimirova T. Toward Performing Image Classification and Object Detection with Convolutional Neural Networks in Autonomous Driving Systems: A Survey, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, Pp. 14076–14119. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3147495.

16. Powers D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation, *Journal of Machine Learning Technologies*, 2011, Vol. 2, Iss.1, Pp. 37–63.

17. Klette R. *Kompyuternoe zrenie. Teoriya i algoritmy* [Concise Computer Vision. An Introduction into Theory and Algorithms]. Moscow, DMK Press Publishing House, 2019, 506 p. (In Russian)

Received: 20.11.2025

Accepted: 25.11.2025