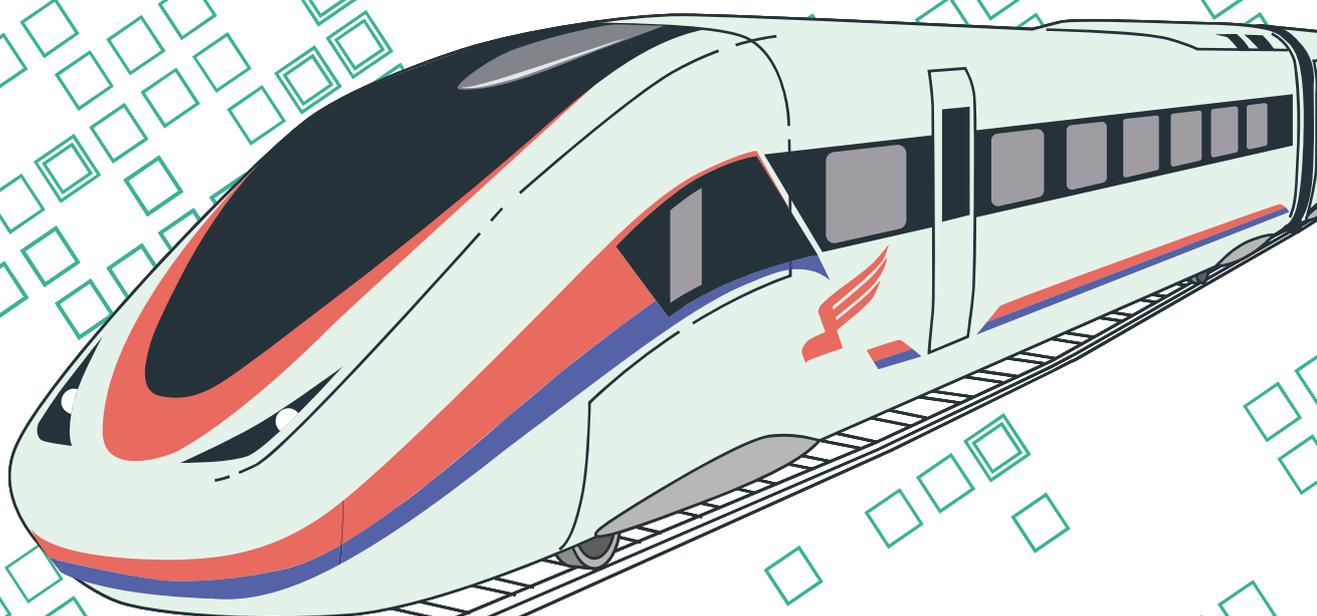


# Интеллектуальные технологии на транспорте

Intellectual Technologies  
on Transport



Выпуск 1  
2026

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ**  
**(сетевой электронный научный журнал)**  
**Выпуск 1 (45), 2026**

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**

ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА87426 от 12.01.2026.

Периодичность выхода — 4 номера в год.

**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).

Информация предназначена для читателей старше 12 лет.

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

---

**Хомоненко А. Д.**, д. т. н., проф., 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., ПГУПС, С.-Петербург, РФ  
**Басыров А. Г.**, д. т. н., проф., ВКА, С.-Петербург, РФ  
**Безродный Б. Ф.**, д. т. н., проф., ООО «1520 Сигнал», Москва, РФ  
**Благовещенская Е. А.**, д. ф.-м. н., проф., 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., 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  
**Утепберганов 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 1 (45), 2026**

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**

Media Service LLC, no. ЭА87426,  
12.01.2026.

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 07.05.2015.

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

The content is for readers over the age of 12.  
Issues of the magazine are available at <http://itt-pgups.ru>

---

**Khomonenko A. D.**, Dr. Sci. in Engineering, Prof.,  
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

**Bezrodny B. F.**, Prof., 1520 Signal LLC, Moscow, Russia

**Blagoveshchenskaya E. A.**, 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.**, 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 “Petrokometa”, 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

**Зуев Д. В., Бочкарев С. В.**

Цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры и ТИМ-решения:  
обзор платформ и проектов ..... 5

### Искусственный интеллект и транспортные системы

**Блюм В. С., Лапшин А. Е.**

Современные многоагентные системы для скрапинга данных ..... 16

**Брект Э. А., Коншина В. Н.**

YOLOv11 для радиографического неразрушающего контроля сварных соединений ..... 23

**Тюгашев А. А.**

Перспективы использования больших языковых моделей искусственного интеллекта  
на транспорте. .... 33

**Юдников С. С., Хомоненко А. Д.**

Сравнительный анализ современных методов сжатия без потерь данных облачных провайдеров ..... 41

### Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей

**Герасимов М., Зверькова Д. А., Карпич Э. Э., Гильванов Р. Г.**

Интерактивное средство поддержки изучения теории и практики работы с двоичным кодом ..... 51

**Кутчиев В. А., Забродин А. В.**

Разработка веб-сервиса для изучения алгоритмов двоичной арифметики с поддержкой  
вариативных методов вычислений ..... 59

**Лобанов А. А., Козырев Г. И., Хомоненко А. Д.**

Интеллектуальные датчики и особенности их применения в ракетно-космической технике ..... 67

### Математическое моделирование и системный анализ

**Гильванов Р. Г., Забродин А. В., Надеева М. Р.**

Пространственная интеграция данных между системами геомоделирования  
и геоинформационными системами: современные подходы и решения ..... 81

### Памяти коллеги

**Смагин Владимир Александрович** ..... 91

# Contents

## Information Security and Data Protection

**Zuev D. V., Bochkarev S. V.**

Digital Twins for Railway Infrastructure and BIM Solutions: An Overview of Platforms and Projects . . . . . 5

## Artificial Intelligence and Transport Systems

**Blyum V. S., Lapshin A. E.**

Modern Multi-Agent Systems for Data Scraping. . . . . 16

**Brekht E. A., Konshina V. N.**

YOLOv11 for Radiographic Non-Destructive Testing of Welded Joints . . . . . 23

**Tyugashev A. A.**

Prospects for Using Large Language Models of Artificial Intelligence in Transport. . . . . 33

**Yudnikov S. S., Khomonenko A. D.**

Comparative Analysis of Modern Lossless Data Compression Methods Used by Cloud Providers . . . . . 41

## Mathematical and Software Support for Computer Complexes and Networks

**Gerasimov M., Zverkova D. A., Karpich E. E., Gilvanov R. G.**

An Interactive Tool to Support the Study of the Theory and Practice of Working with Binary Code . . . . . 51

**Kutchiev V. A., Zabrodin A. V.**

Development of a Web Service for Studying Binary Arithmetic Algorithms with Support  
for Variable Calculation Methods. . . . . 59

**Lobanov A. A., Kozyrev G. I., Khomonenko A. D.**

The Use of Intelligent Sensors in Space and Rocket Technology . . . . . 67

## Mathematical Modelling and System Analysis

**Gilvanov R. G., Zabrodin A. V., Nadeeva M. R.**

Spatial Data Integration in Geomodelling and Geoinformation Systems:  
Contemporary Approaches and Solutions. . . . . 81

## In memory of colleague

**Smagin Vladimir Aleksandrovich** . . . . . 91

УДК 004.94:656.2

# Цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры и ТИМ-решения: обзор платформ и проектов

**Зуев Денис Владимирович**

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

**Бочкарев Сергей Владимирович**

— канд. техн. наук, технический директор. Научные интересы: нейронные сети, цифровые двойники. E-mail: bochkareffsv@yandex.ru

ООО «Синтез АТ», Россия, 199004, Санкт-Петербург, Средний пр. Васильевского острова, д. 28/2

**Для цитирования:** Зуев Д. В., Бочкарев С. В. Цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры и ТИМ-решения: обзор платформ и проектов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 5–15. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-5-15

**Аннотация.** Цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава становятся базовой технологией повышения надежности, энергоэффективности и управляемости перевозочного процесса за счет сквозной интеграции данных жизненного цикла (изыскания — проектирование — строительство — эксплуатация — ТОиР). **Цель:** структурировать современные решения класса «цифровой двойник» в железнодорожной отрасли. **Результаты:** выполнен обзор корпоративных платформ и отраслевых экосистем (эксплуатационные платформы мониторинга состояния, ТИМ-решения для инфраструктуры, технология управления жизненным циклом продукта уровня сети), а также прикладных проектов у операторов и производителей. Предложена классификация по типам решений и этапам жизненного цикла, приведена сравнительная матрица ведущих платформ и кейсов, рассмотрены вопросы стандартизации (форматы OpenVIM/IFC), требований информационной безопасности и эксплуатационных параметров. **Практическая значимость:** результаты обзора могут быть использованы при выборе технологического стека и разработке дорожной карты внедрения цифровых двойников на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, железнодорожная инфраструктура, технологии информационного моделирования, ТИМ-решения, технология управления жизненным циклом продукта, среда общих данных, мониторинг состояния, предиктивное обслуживание, OpenVIM, информационная безопасность

**2.3.6** — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки);  
**2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

## Введение

Цифровые двойники (ЦД) в железнодорожной отрасли развиваются как ответ на рост сложности инфраструктуры и подвижного состава, ужесточение требований к безопасности и пунктуальности, а также необходимость снижения стои-

мости жизненного цикла активов [1]. Практика внедрений охватывает как эксплуатационные контуры (предиктивное обслуживание, мониторинг состояния), так и инвестиционные контуры (ТИМ-проектирование, управление строительством,

управление активами). В обзоре зафиксированы решения и кейсы, реализуемые в России, Германии, Франции, Нидерландах, Китае, Великобритании и США, что позволяет сопоставить подходы операторов и вендоров в разных регуляторных и технологических средах [2, 3].

### Концепция цифрового двойника и место ТИМ в железнодорожной отрасли

Представление каждого физического объекта контроля в формате цифровой информационной модели и обеспечение взаимодействия и информационной связи между ними, включая цифровое и физическое пространство, позволяет отобразить концепцию технологии цифрового двойника.

Для обеспечения информационной связи между физическим объектом контроля и его цифровой модели требуется устанавливать контроллеры, которые будут измерять диагностические параметры объекта контроля (рис. 1). Значения параметров, измеряемые контроллерами, должны аккумулироваться в цифровой информационной модели (ЦИМ) объекта контро-

ля. По мере наполнения данных ЦИМ объекта контроля преобразуется в цифровой двойник, что позволит решать задачи диагностирования и предиктивной аналитики в процессе эксплуатации. Цифровой двойник будет учитывать все изменения, происходящие с объектом контроля, накапливать диагностическую информацию о его поведении, что позволит адекватно описывать и прогнозировать поведение физического объекта. На основе данных цифрового двойника объекта контроля может быть реализована поддержка принятия решений по содержанию и техническому обслуживанию объекта контроля [4].

Цифровой двойник железнодорожной системы опирается на два класса данных:

1. Проектно-изыскательские данные (технологии информационного моделирования (ТИМ), технологии управления жизненным циклом объекта) — это комплекс научно обоснованных сведений о природных, геологических, экологических и климатических условиях участка, необходимых для проектирования, строительства и реконструкции («как спроектировано / как построено»).



Рис. 1. Концепция цифрового двойника в структуре системного проектирования на примере стрелочного электропривода

2. Эксплуатационные данные (системы технической диагностики и мониторинга и IoT, планы техобслуживания и ремонта (ТОиР), диагностика, события, осмотры) — это совокупность технических параметров, определяющих надежность, работоспособность и эффективность использования объекта (машины, материала, здания) в реальных условиях («как работает сейчас»).

Поток диагностических данных от множества датчиков на подвижном составе и в инфраструктуре синхронизирует виртуальную модель с реальным объектом вблизи реального времени, обеспечивая прозрачность состояния и основу для предиктивной аналитики и оптимизационных сценариев [1, 4].

На протяжении жизненного цикла (особенно этапа эксплуатации) ЦИМ объекта контроля претерпевает постепенное преобразование сначала в части уточнения геометрических и атрибутивных параметров, а затем трансформации в соответствии с эксплуатационными событиями, выражающимися в основном в изменениях, вносимых при техническом обслуживании, реконструкциях и капитальных ремонтах.

Таким образом, для каждого этапа жизненного цикла ЦИМ объекта должна содержать отдельную структуру данных, полностью характеризующую ее геометрическую и атрибутивную составляющие, а также дополнительные сведения и документы, необходимые на данном этапе. По мере завершения формирования модели и перехода на следующий этап жизненного цикла структура этапа должна закрываться и исключать несанкционированное внесение изменений [5–7].

Постепенное накопление данных в ЦИМ от информационных систем на этапе эксплуатации и ввод их из уже имеющихся в эксплуатации справочников делает целесообразным их использование в качестве единого источника достоверных данных для передачи непосредственно в системы управления жизненным циклом.

Разработанная и постоянно развиваемая единая корпоративная платформа проектирования и ведения технической документации (ЕКП ТД) для использования в ОАО «РЖД» служит базой для раз-

работки цифрового двойника инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД». Первоисточником информации для создания цифрового двойника является рабочая и конструкторская документация, ведение которой заложено в ЕКП ТД.

Получение географических координат с картографических веб-сервисов и от систем пространственного сканирования и использование их в технической документации позволяет строить масштабные планы инфраструктуры и учитывать данные о высотном расположении объектов.

Получение от заводов-изготовителей и проектных институтов конструкторской и рабочей документации на устройства и их 3D-моделей в АСУ ВІМ (Building Information Modeling) позволит формировать объем геометрических, количественных, а также любых атрибутивных данных в привязке к конкретным объектам строительства и их конструкциям, необходимых для задач управления и информационного моделирования.

Пример схемы взаимодействия информационного моделирования АСУ ВІМ и цифрового двойника хозяйства автоматики и телемеханики выглядит следующим образом:

- заводы-изготовители передают в автоматизированную обучающую систему (АОС-ШЧ) заводской паспорт и 3D-модели устройств, затем данные передаются в информационно-аналитическую систему обеспечения процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики (ИАС-Ш);
- проектные институты передают проект в формате ОФ-ТД (отраслевой формат технической документации) в ЕКП ТД;
- ИАС-Ш выступает интеграционной точкой для получения данных от информационных систем хозяйства автоматики и телемеханики и аккумулирует в себе данные с последующей передачей информации в ЕКП ТД;
- в ЕКП ТД формируются цифровые двойники объектов железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) и наполняются атрибутивными значениями;
- из ЕКП ТД в АСУ ВІМ передаются цифровые двойники объектов ЖАТ и двухниточные планы станции. В АСУ ВІМ осуществляется:

- проверка на ошибки в проектах от проектных институтов и отправка обратно на доработку в случае необходимости;
- наполнение моделей объектов ОАО «РЖД» атрибутивными значениями;
- формирование масштабных планов;
- геопозиционирование конструкций объектов ОАО «РЖД»;
- формирование цифрового двойника инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД»;
- передача после реализации строительства и формирования цифрового двойника инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД» выверенной документации в ЕКП ТД для последующей эксплуатации.

### Классификация решений и охват жизненного цикла

По типам решения сгруппированы следующим образом (табл. 1):

- корпоративная платформа — решения общекомпанийского уровня (инфраструктура, единые стандарты безопасности и авторизации);
- платформа — специализированные технологические фундаменты (например, платформа данных, low-code-конструкторы), на которых строятся конкретные продукты;
- проект — точечные решения, направленные на конкретную бизнес-задачу, имеющие четкие временные рамки и уникальный функционал.

Таблица 1

#### Классификация решений по типам

Тип решения	Количество решений
Корпоративная платформа	1
Платформа	4
Проект	10

По охвату стадий жизненного цикла (табл. 2) доминируют эксплуатационные внедрения (мониторинг/ТО/оптимизация), что логично: именно там достигается быстрый эффект за счет снижения внеплановых отказов и простоев [2].

Таблица 2

### Классификация по этапам жизненного цикла

Этап ЖЦ	Количество решений
Эксплуатация	12
Проектирование	4
Строительство	3
Изыскания	2
—	1

### Сравнительный обзор ключевых платформ и экосистем

В табл. 3 приведена матрица, позволяющая сопоставить решения по типу, объекту охвата, ключевой функции и зрелости (промышленная эксплуатация/пилот/развертывание).

#### Эксплуатационные платформы мониторинга состояния и предиктивной аналитики

Подход эксплуатационного цифрового двойника реализуется как объединение телеметрии, данных ТОиР и аналитики с выдачей рекомендаций/предупреждений [1]. Отдельно стоит отметить следующие проекты:

- Railigent X — ориентация на предиктивное обслуживание, интеграция большого числа источников данных, расширение на инфраструктурные подсистемы.
- HealthHub Platform — заявлено объединение более 20 источников данных (включая эксплуатационные и внешние), обработка в реальном времени и рекомендации по обслуживанию и режимам эксплуатации. Приведены эффекты пилотов SNCF (французская железнодорожная компания) на участке Париж — Лион, а также кейс снижения неожиданных неисправностей в Нидерландах.
- «Доверенная среда локомотивного комплекса» и «Умный локомотив» — консолидация данных по тяговому парку и предиктивная аналитика на основе сенсоров и облачной обработки (пилоты и предотвращение отказов за счет раннего выявления проблемных узлов).

## Общая сравнительная матрица решений

Решение	Вендор/ организация	Тип	Объект охвата	Ключевые функции	Зрелость/ статус
Railigent X [8]	Siemens Mobility	Платформа	Подвижной состав (расширение на инфраструктуру)	Интеллектуальный мониторинг	Промышленная эксплуатация
3DEXPERIENCE (Virtual Twin) [9]	Dassault Systèmes	Платформа	Инфраструктура, подвижной состав, операции (уровень сети)	Сквозной ТИМ и управление жизненным циклом продукта	Широко применяемая корпоративная платформа
OpenRail + iTwin [10]	Bentley Systems	Платформа	Полный ЖЦ инфраструктуры (изыскания → проект → стройка → эксплуатация)	3D-/4D-ТИМ	Промышленная эксплуатация, широкая экосистема
HealthHub [11, 12]	Alstom	Платформа	Подвижной состав и инфраструктура	Диагностика состояния	Промышленная эксплуатация
«Доверенная среда локомотивного комплекса» [2, 4]	ОАО «РЖД»	Корпоративная платформа	Локомотивный комплекс	Сбор и хранение данных о состоянии тягового ПС	Эксплуатация
«Умный локомотив» [2, 4]	АО «НИИАС» / ОАО «РЖД»	Проект	Локомотивы (онборд-сенсоры и облачная аналитика)	Аналитика ИИ	Пилотная эксплуатация
360° MSP / Digital Depot [13]	Deutsche Bahn / Siemens	Проект	Путь и депо (мультисенсорное сканирование, цифровое депо)	Высокоточный цифровой образ пути и КС	Пилот/внедрение
ECML Digital Twin [14]	Network Rail	Проект	Участок магистрали (мосты, земляное полотно, путь)	Оптимизация графика капремонтв	Эксплуатация
Locomotive DT Program [15]	Union Pacific	Проект	~7000 локомотивов	Виртуальные профили с онлайн-телеметрией	Эксплуатация
Network-wide Simulation [16]	Norfolk Southern	Проект	Сеть железной дороги	Имитация расписаний/потоков (топливо, пунктуальность)	Эксплуатация
Fuxing Digital Train [17]	CRRC	Проект	Скоростной поезд 350+ км/ч	Виртуальные испытания прочности	Разработки/внедрение
Beijing — Shanghai HSR DT [18]	China Railway	Проект	ВСМ более 1300 км (путь, тоннели, мосты)	Интеграция мониторинга в единую ЦД-платформу	Развертывание
Guangzhou Baiyun Station DT [18]	China Railway	Проект	Узловой вокзал	Виртуальная модель служб вокзала	Реализовано
Shanghai Metro Line DT	Shanghai Metro	Проект	Линия метро	ЦД-управление интервалами и энергопотреблением	Эксплуатация
HSR 5G Network DT Planning [19]	China Mobile / ZTE	Проект	Сеть связи вдоль ВСМ	Планирование сети (расположение 5G-антенн)	Анонс/пилот

### PLM-/BIM-платформы уровня сети и жизненного цикла

Следует выделить такие проекты, как:

1. 3DEXPERIENCE (Virtual Twin) — бизнес-платформа и инновационная платформа, которая предоставляет организациям целостное видение их деловой активности и экосистемы в режиме реального времени.

2. OpenRail + iTwin — платформа полного жизненного цикла инфраструктуры, где ТИМ-контур интегрируется с эксплуатацией (изыскания → проект → стройка → эксплуатация).

### Проекты цифровых двойников: кейсы по странам и операторам

Для прикладных проектов полезно сравнивать объект охвата, функцию (оптимизация ремонтов, энергопотребления, расписаний), зрелость (табл. 4).

### Стандартизация и совместимость (OpenBIM/IFC)

Практика внедрения ЦД для инфраструктуры прямо зависит от зрелости стандартов дан-

ных и возможностей обмена между вендорами. В [7, 12] подчеркивается значимость адаптации IFC для инфраструктурных объектов и развитие OpenBIM-подходов как основы межплатформенной совместимости. В табл. 5 представлен свод по поддержке стандартов IFC/OpenBIM.

Отдельно следует отметить buildingSMART как ключевую международную организацию, развивающую OpenBIM-подходы и IFC-экосистему: в [7, 12] это рассматривается как критически важный слой совместимости.

### Требования информационной безопасности и доверенная эксплуатация

Для цифровых двойников, особенно на критической инфраструктуре, типовой набор требований включает разграничение доступа (Role-Based Access Control — RBAC), защищенный канал, шифрование данных на хранении и аудит действий [13]. Для платформенного класса решений такие требования фиксируются как базовые, тогда как для отдельных проектов детали зависят от оператора и архитектуры развертывания. Свод

Таблица 4

Проекты: свод по странам и операторам

Решение	Оператор	Страна	Объект охвата	Ключевые функции	Зрелость/статус
360° MSP / Digital Depot	DB / S-Bahn Hamburg	DE	Путь и депо	Высокоточный цифровой образ пути и КС	Пилот/внедрение
ECML Digital Twin	Network Rail	UK	Участок магистрали	Оптимизация графика капремонт	Эксплуатация
Locomotive DT Program	Union Pacific	US	~7000 локомотивов	Виртуальные профили с онлайн-телеметрией	Эксплуатация
Network-wide Simulation	Norfolk Southern	US	Сеть железной дороги	Имитация расписаний/ потоков для топлива и пунктуальности	Эксплуатация
Fuxing Digital Train	CRRC	CN	Высокоскоростной поезд	Виртуальные испытания прочности	Разработки/ внедрение
Beijing — Shanghai HSR DT	China Railway	CN	ВСМ 1300+ км	Интеграция многосистемного мониторинга	Развертывание
Guangzhou Baiyun Station DT	China Railway	CN	Узловой вокзал	Виртуальная модель служб вокзала	Реализовано
Shanghai Metro Line DT	Shanghai Metro	CN	Линия метро	Оптимизация интервалов и энергопотребления	Эксплуатация
HSR 5G Network DT Planning	China Mobile/ China Railway	CN	Сеть связи вдоль ВСМ	DT-планирование размещения 5G-антенн	Анонс/пилот
«Умный локомотив»	РЖД/НИИАС	RU	Локомотивы	ИИ-аналитика состояния узлов	Пилотная эксплуатация

Свод по поддержке стандартов IFC/OpenBIM

Решение	Тип	Поддержка IFC	Поддержка OpenBIM (buildingSMART)	Зрелость / статус
Railigent X	Платформа	Не указано	Не указано	Промышленная эксплуатация
3D-EXPERIENCE (Virtual Twin)	Платформа	Не указано	Не указано	Enterprise-платформа
OpenRail + iTwin	Платформа	Да	Да	Промышленная эксплуатация
HealthHub	Платформа	Не указано	Не указано	Промышленная эксплуатация
«Доверенная среда локомотивного комплекса»	Корпоративная платформа	Не указано	Не указано	Эксплуатация

по требованиям информационной безопасности представлен в табл. 6.

### Эксплуатационные характеристики: развертывание, поток данных, задержки, SLA, KPI

Для практического внедрения ЦД-платформы важны не только функции, но и операционная физика системы: где развернуто (локально/облако/гибрид), какой профиль данных (пакетный/поточковый), ожидаемая задержка передачи данных и измеримые KPI (например, снижение аномалий, ускорение обследований, предотвращение отказов, оптимизация энергопотребления) [8]. Свод представлен в табл. 7.

### Практические выводы и рекомендации по выбору стека

Создание единого информационного пространства в системе диагностирования и мо-

нитинга физических активов является одним из ключевых направлений стратегии цифровой трансформации и инициатив ОАО «РЖД».

Объединение диагностических баз данных в единое информационное пространство позволит:

- улучшить межуровневое взаимодействие;
- синхронизировать работу производственных подразделений, осуществляющих диагностирование и мониторинг физических активов;
- обеспечить достоверный учет фактического наличия и состояния диагностических комплексов и инструментов (технических и программных средств);
- повысить уровень предиктивной аналитики.

На основе рассмотренных решений можно выделить устойчивые паттерны внедрения:

1. Начинать с эксплуатационных кейсов (предиктивное ТО, мониторинг состояния), где проще доказать экономический эффект и обкатать данные/ИБ [2].

Таблица 6

Свод по требованиям информационной безопасности

Решение	Тип	RBAC	TLS (в канале)	Шифрование на хранении	Аудит
Railigent X	Платформа	Да	Да	Да	Да
3DEXPERIENCE (Virtual Twin)	Платформа	Да	Да	Да	Да
OpenRail + iTwin	Платформа	Да	Да	Да	Да
HealthHub	Платформа	Да	Да	Да	Да
«Доверенная среда локомотивного комплекса»	Корпоративная платформа	Да	Да	Да	Да
Проектные решения (кейс-проекты)	Проект	Зависит от оператора	Зависит от оператора	Зависит от оператора	Зависит от оператора

Таблица 7

## Эксплуатационные характеристики

Решение	Развертывание	Данные/ интеграция	Задержка	КРИ/эффект
Locomotive DT Program	Гибрид (онборд → облако)	Поток данных из систем диагностики и IoT (обработка данных в реальном времени)	Секунды	Предотвращение отказов в рейсе
ECML Digital Twin	Локальное решение	Пакетные данные (файлы). Данные собираются и обрабатываются в автономном режиме, часто по расписанию	Секунды — минуты	Оптимизация капвложений
360° MSP / Digital Depot	Локальное решение/гибрид	Пакетные данные (файлы). Данные собираются и обрабатываются в автономном режиме, часто по расписанию сессии)	Секунды — минуты	Ускорение обследований и планирования
Beijing — Shanghai HSR DT	Гибрид (мультисистемная интеграция)	Гибрид потока данных в реальном времени и автономном режиме	Секунды	Синхронизация мониторинга по подсистемам
Shanghai Metro Line DT	Локально/облако (SCADA + аналитика)	Интеллектуальный контроллер RAN в режиме близкого к реальному времени	Секунды	Снижение энергопотребления
HSR 5G Network DT Planning	Облако	Пакетные данные (файлы). Данные собираются и обрабатываются в автономном режиме, часто по расписанию	Минуты	Оптимизация размещения БС

2. Параллельно строить слой данных и интеграций: системы технической диагностики и мониторинга / интернет вещей + осмотры + ТОиР + BIM/GIS, с единым реестром активов и контролем качества данных [5].

3. Закладывать совместимость (OpenBIM/IFC там, где есть инфраструктурный BIM-контур) и избегать закрытых моделей данных без экспортного контура [7].

4. Заранее фиксировать эксплуатационные параметры и КРИ, чтобы ЦД не оставался витриной визуализации, а работал как контур управления и принятия решений [8].

## Заключение

Проведенный обзор показывает, что цифровые двойники на железнодорожном транспорте

развиваются по двум взаимодополняющим траекториям:

- эксплуатационные платформы мониторинга состояния и предиктивной аналитики;
- сквозные ТИМ и экосистемы управления жизненного цикла инфраструктуры, включая сценарное моделирование на уровне сети.

На стороне внедрения ключевыми факторами успеха являются качество и полнота данных, стандартизация (особенно для инфраструктурного ТИМ), выполнение требований информационной безопасности и измеримость эффекта через КРИ [13]. Представленные классификация и сравнительные таблицы могут служить основой для выбора платформы, проектирования архитектуры интеграций и формирования дорожной карты внедрения цифровых двойников в железнодорожных организациях.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грузд Д. Е. Цифровые двойники на железнодорожном транспорте // Вопросы права. 2024. № 2. С. 143–144.
2. Цифровые двойники // РЖД Цифровой. 2022. 3 декабря. URL: <http://rzdigital.ru/technology/tsifrovye-dvoyniki/> (дата обращения: 12.02.2026).
3. Озеров А. В., Бочков А. В. Текущее состояние и перспективы мировых исследований в области интеллектуального железнодорожного транспорта // Интеллектуальный транспорт. 2025. № 2 (34). С. 43–66.
4. Прохоров А. Н., Лысачев М. Н. Цифровой двойник: анализ, тренды, мировой опыт: корпоративное издание / науч. ред. А. И. Боровков. 1-е изд., испр. и доп. М.: АльянсПринт, 2020. 400 с.

5. Цифровая железная дорога — ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники / В.П. Куприяновский [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13, № 3. С. 129–166. DOI: 10.25559/SITITO.2017.3.546.
6. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 44 p.
7. IFC 4.3.2 Documentation. URL: <http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org> (дата обращения: 12.02.2026).
8. Railigent X — Rail Asset Management // Siemens Mobility Global. URL: <http://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/digital-solutions-software/digital-services/railigent-x.html> (дата обращения: 12.02.2026).
9. Chen M. Unleashing the Benefits of Virtual Twins in Rail // Dassault Systèmes Blog. 2023. 3 July. URL: <http://blog.3ds.com/industries/business-services/unleashing-the-benefits-of-virtual-twins-in-rail> (дата обращения: 12.02.2026).
10. Bentley Systems. Digital Twins Drive Better Outcomes across Rail Lifecycle: e-book. 2022. URL: <http://www.bentley.com/wp-content/uploads/ebook-digital-twins-rail-asset-lifecycle-en.pdf> (дата обращения: 12.02.2026).
11. Alstom Launches HealthHub, an Innovative Tool for Predictive Maintenance // Alstom Company Official Website. 2014. 23 September. URL: <http://www.alstom.com/press-releases-news/2014/9/innotrans2014-alstom-launches-healthhub-an-innovative-tool-for-predictive-maintenance-> (дата обращения: 12.02.2026).
12. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2022. 26 p.
13. The Solution for the Digital Rail Network. URL: <http://www.bahnbaugruppe.de/bahnbaugruppe-en/Sustainable-Innovative/Multisensor-Platform-12836384> (дата обращения: 12.02.2026).
14. East Coast Digital Programme // Network Rail. URL: <http://www.networkrail.co.uk/our-work/our-routes/east-coast/east-coast-digital-programme> (дата обращения: 12.02.2026).
15. Union Pacific Signs Largest Locomotive Modernization Deal in Rail Industry History with Wabtec // Union Pacific. 2022. 27 July. URL: <http://www.up.com/press-releases/service/wabtec-locomotive-modernization-nr-220727> (дата обращения: 12.02.2026).
16. Jihan G. Virtual Railroads, Real Impact: How Digital Twins Drive Efficiency // Norfolk Southern Company Official Website. 2026. 14 January. URL: <http://www.norfolksouthern.com/en/newsroom/story-yard/virtual-railroads--real-impact--how-digital-twins-drive-efficiency> (дата обращения: 12.02.2026).
17. Поезд «Фусин» прибыл в Яньань: протяженность высокоскоростных железных дорог Китая превысила 50 000 км // CRRC Group Official Website. 2026. 4 January. URL: [http://www.crrcgc.cc/ru/2026-01/20/article\\_2026012013483345175.html](http://www.crrcgc.cc/ru/2026-01/20/article_2026012013483345175.html) (дата обращения: 12.02.2026).
18. Liu Z., Lin S. Digital Twin Model and Its Establishment Method for Steel Structure Construction Processes // Buildings. 2024. Vol. 14, iss. 4. Art. No. 1043. 17 p. DOI: 10.3390/buildings14041043.
19. China Mobile, ZTE Revolutionize High-Speed Railway with 5G-A Digital Twin // ZTE Corporation Official Website. 2024. 25 March. URL: <http://www.zte.com.cn/global/about/news/china-mobile-zte-revolutionize-high-speed-railway-with-5g-a-digital-twin.html> (дата обращения: 12.02.2026).

Дата поступления: 20.02.2026

Решение о публикации: 20.02.2026

# Digital Twins for Railway Infrastructure and BIM Solutions: An Overview of Platforms and Projects

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

**Sergei V. Bochkarev** — PhD in Engineering, Technical Director. Research interests: neural networks, digital twins.  
E-mail: bochkareffsv@yandex.ru

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

**For citation:** Zuev D.V., Bochkarev S.V. Digital Twins for Railway Infrastructure and BIM Solutions: An Overview of Platforms and Projects, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 5–15. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-5-15. (In Russian)

**Abstract.** *Digital twins of railway infrastructure and rolling stock are emerging as a foundational technology for enhancing the reliability, energy efficiency, and operational controllability by enabling end-to-end integration of lifecycle data (surveying — design — construction — operation — maintenance and repair). **Purpose:** to systematize contemporary digital twin solutions in the railway sector. **Results:** an overview of corporate platforms and industry ecosystems, such as operational condition-monitoring platforms, BIM solutions for infrastructure, and network-level PLM approaches, is presented, together with descriptions of applied projects implemented by operators and manufacturers. A classification by solution type and lifecycle stage is proposed; a comparative matrix of leading platforms and cases is presented; and issues of standardization (OpenBIM/IFC), information security requirements, and operational parameters are considered. **Practical significance:** the review's findings can inform the selection of an appropriate technology stack and guide the formulation of a roadmap for deploying digital twins in railway transport.*

**Keywords:** *digital twin, railway infrastructure, building information modelling, BIM solutions, product lifecycle management technology, common data environment, condition monitoring, predictive maintenance, OpenBIM, information security*

## REFERENCES

1. Gruzd D.E. Tsifrovye dvoyniki na zheleznodorozhnom transporte [Digital Twins in Railway Transport], *Voprosy Prava*, 2024, no. 2, pp. 143–144. (In Russian)
2. Tsifrovye dvoyniki [Digital Twins], *RZhD Tsifrovoy [RZD.Digital]*. Published online at December 03, 2022. Available at: <http://rzdigital.ru/technology/tsifrovye-dvoyniki/> (accessed: February 12, 2026). (In Russian)
3. Ozerov A.V., Bochkov A.V. Tekushchee sostoyanie i perspektivy mirovykh issledovaniy v oblasti intellektualnogo zheleznodorozhnogo transporta [The Current State and Prospects of Global Research in the Field of Intelligent Railway Transport], *Intellektualnyy transport*, 2025, no. 2 (34), pp. 43–66. (In Russian)
4. Prokhorov A.N., Lysachev M.N. Tsifrovoy dvoynik: analiz, trendy, mirovoy opyt: korporativnoe izdanie [Digital Twin: Analysis, Trends, and Global Experience: Corporate Edition]. Moscow, AlyansPrint Publishing House, 2020, 400 p. (In Russian)
5. Kupriyanovsky V.P., et al. Tsifrovaya zheleznaya doroga — ERTMS, BIM, GIS, PLM i tsifrovye dvoyniki [Digital Railway — ERTMS, BIM, GIS, PLM and Digital Twins], *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern Information Technologies and IT-education]*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 129–166. DOI: 10.25559/SITITO.2017.3.546. (In Russian)

6. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles. Geneva, International Organization for Standardization, 2018, 44 p.
7. IFC 4.3.2 Documentation. Available at: <http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org> (accessed: February 12, 2026).
8. Railigent X — Rail Asset Management, *Siemens Mobility Global*. Available at: <http://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/digital-solutions-software/digital-services/railigent-x.html> (accessed: February 12, 2026).
9. Chen M. Unleashing the Benefits of Virtual Twins in Rail, *Dassault Systèmes Blog*. Published online at July 03, 2023. Available at: <http://blog.3ds.com/industries/business-services/unleashing-the-benefits-of-virtual-twins-in-rail> (accessed: February 12, 2026).
10. Bentley Systems. Digital Twins Drive Better Outcomes Across Rail Lifecycle: E-book, 2022. Available at: <http://www.bentley.com/wp-content/uploads/ebook-digital-twins-rail-asset-lifecycle-en.pdf> (accessed 12.02.2026).
11. Alstom Launches HealthHub, an Innovative Tool for Predictive Maintenance, *Alstom Company Official Website*. Published online at September 23, 2014. Available at: <http://www.alstom.com/press-releases-news/2014/9/innotrans2014-alstom-launches-healthhub-an-innovative-tool-for-predictive-maintenance-> (accessed: February 12, 2026).
12. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva, International Organization for Standardization, 2022, 26 p.
13. The Solution for the Digital Rail Network. Available at: <http://www.bahnbaugruppe.de/bahnbaugruppe-en/Sustainable-Innovative/Multisensor-Platform-12836384> (accessed: February 12, 2026).
14. East Coast Digital Programme, *Network Rail*. Available at: <http://www.networkrail.co.uk/our-work/our-routes/east-coast/east-coast-digital-programme> (accessed: February 12, 2026).
15. Union Pacific Signs Largest Locomotive Modernization Deal in Rail Industry History with Wabtec, *Union Pacific*. Published online at July 27, 2022. Available at: <http://www.up.com/press-releases/service/wabtec-locomotive-modernization-nr-220727> (accessed: February 12, 2026).
16. Jihan G. Virtual Railroads, Real Impact: How Digital Twins Drive Efficiency, *Norfolk Southern Company Official Website*. Published online at January 14, 2026. Available at: <http://www.norfolksouthern.com/en/newsroom/story-yard/virtual-railroads--real-impact--how-digital-twins-drive-efficiency> (accessed: February 12, 2026).
17. Fuxing EMU Reaches Yan'an as China's High-Speed Rail Mileage Exceeds 50,000 km, *CRRC Group Official Website*. Published online at January 04, 2026. Available at: [http://www.crrecg.com/en/2026-01/14/article\\_2026011416345448907.html](http://www.crrecg.com/en/2026-01/14/article_2026011416345448907.html) (accessed: February 12, 2026).
18. Liu Z., Lin S. Digital Twin Model and Its Establishment Method for Steel Structure Construction Processes, *Buildings*, 2024, vol. 14, iss. 4, art. no. 1043, 17 p. DOI: 10.3390/buildings14041043.
19. China Mobile, ZTE Revolutionize High-Speed Railway with 5G-A Digital Twin, *ZTE Corporation Official Website*. Published online at March 25, 2024. Available at: <http://www.zte.com.cn/global/about/news/china-mobile-zte-revolutionize-high-speed-railway-with-5g-a-digital-twin.html> (accessed: February 12, 2026).

Received: 20.02.2026

Accepted: 20.02.2026

УДК 004.921

## Современные многоагентные системы для скрапинга данных

**Блюм Владислав Станиславович** — канд. техн. наук, доцент кафедры бизнес-информатики и менеджмента. Научные интересы: иммунокомпьютинг, технологии искусственного интеллекта. E-mail: vladblum7@gmail.com

**Лапшин Андрей Евгеньевич** — магистрант 2-го курса направления 09.04.03 «Прикладная информатика». Научные интересы: интеллектуальный анализ данных. E-mail: andreyka.lapshin.2002@mail.ru

Институт технологий предпринимательства и права, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А

**Для цитирования:** Блюм В. С., Лапшин А. Е. Современные многоагентные системы для скрапинга данных // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 16–22. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-16-22

**Аннотация.** Рассматриваются архитектура многоагентных систем (МАС), свойства агентов, особенности коммуникации и применимость данного подхода к задачам веб-скрапинга. Актуальность исследования определяется стремительным ростом объемов данных в сети Интернет и ограниченностью классических централизованных систем веб-скрапинга, сталкивающихся с проблемами масштабирования, блокировок и недостаточной устойчивости. В этих условиях возрастает потребность в использовании децентрализованных архитектур, способных адаптироваться к динамичной среде и эффективно собирать большие объемы информации. Одним из наиболее перспективных подходов являются многоагентные системы, обеспечивающие распределенный сбор, обработку и хранение данных. **Цель:** разработка и структурирование подхода к использованию многоагентных систем для веб-скрапинга, а также описание обобщенного алгоритма, обеспечивающего масштабируемый, отказоустойчивый и адаптивный сбор данных. **Методы:** теоретический анализ свойств многоагентных систем, архитектурных моделей и коммуникационных механизмов между агентами; изучение существующих практических решений распределенного краулинга; синтез обобщенного алгоритма на основе выделения типовых ролей агентов (планировщик, сборщик, парсер, обработчик данных, агент обхода защиты). **Результаты:** описана трехуровневая архитектура МАС, включающая уровни сбора, обработки/координации и хранения данных. Выделены ключевые свойства агентов и показаны их роли в задаче скрапинга. Представлены функции пяти типов агентов, применяемых в распределенном веб-скрапинге, и предложена схема взаимодействия между ними. На основе анализа существующих решений сформирован обобщенный алгоритм распределенного скрапинга, отражающий взаимодействие специализированных агентов, который включает этапы инициализации, распределения задач, загрузки страниц, обработки ошибок блокировки, парсинга контента и сохранения данных. Показано, что многоагентный подход обеспечивает параллелизм, масштабируемость, отказоустойчивость и гибкость при работе с веб-ресурсами. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем массового сбора данных, построении распределенных веб-краулеров и создании платформ анализа информации на основе МАС. Обобщенный алгоритм может служить основой для реализации гибких и масштабируемых систем, способных эффективно функционировать в условиях больших объемов данных, динамических изменений веб-страниц и наличия защитных механизмов. **Обсуждение:** в статье описывается интеграция свойств и принципов многоагентных систем в контекст веб-скрапинга с формированием единой обобщенной модели взаимодействия агентов. Представленный алгоритм

отражает практическую структуру функционирования распределенного краулера и демонстрирует, как различные типы агентов могут обеспечивать координацию, сбор, анализ и фильтрацию данных при работе с динамичными и защищенными веб-ресурсами. Подчеркнута значимость децентрализации и адаптивности для современного веб-скрапинга, включая работу в условиях ограничений, связанных с антибот-защитами.

**Ключевые слова:** многоагентные системы, скрапинг, масштабирование, проактивность, автономность

### 1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

#### Введение

В современном мире объем данных, публикуемых в интернете, растет экспоненциально. Согласно данным Forbes, к 2025 году глобальный объем данных достигнет 175 зеттабайт [1]. Для их обработки бизнес и наука все чаще используют веб-скрапинг — технологию автоматизированного извлечения информации с веб-страниц. Он применяется в маркетинге (мониторинг цен конкурентов), финансовой аналитике (сбор котировок), науке (агрегация данных из PubMed, arXiv) и даже правительственных структурах (мониторинг открытых данных).

Классические решения, построенные на централизованных скриптах, сталкиваются с рядом ограничений:

- затрудненная работа при больших объемах [2];
- блокировки со стороны сайтов (Cloudflare, reCAPTCHA);
- сложности при масштабировании.

Для преодоления этих проблем развивается подход на основе мультиагентных систем (МАС), где вместо одного монолитного скрипта работает распределенная команда агентов. Такой метод обеспечивает гибкость, устойчивость и эффективность при работе с динамичным веб-контентом [3].

#### Основная часть

Многоагентная система — это система, состоящая из множества автономных взаимодействующих вычислительных единиц, называемых агентами. Каждый агент обладает следующими качествами:

- автономностью — способностью действовать без прямого вмешательства человека;

- реактивностью — способностью воспринимать окружающую среду и реагировать на ее изменения;
- проактивностью — способностью к целенаправленному поведению и преследованию целей;
- социальной способностью — способностью взаимодействовать с другими агентами для решения задач.

В контексте сбора и хранения информации агенты могут быть программными модулями, роботами, датчиками в IoT-сетях или даже бизнес-процессами.

Архитектура такой системы обычно является частным случаем классической трехуровневой модели Presentation Layer — Business Logic Layer — Data Access Layer, широко описанной в литературе по программной инженерии [4].

**Уровень сбора данных** (агенты-сборщики) отвечает за непосредственное взаимодействие с источниками информации, будь то физические датчики, веб-страницы, API или пользовательский ввод. Эти агенты формируют первичный поток данных, необходимый для последующего анализа. Примерами могут служить дроны, обследующие сельскохозяйственные угодья, программные агенты, отслеживающие биржевые котировки, или температурные датчики в инфраструктуре умного города. Как правило, такие агенты обладают ограниченными вычислительными ресурсами, мобильностью и узкой специализацией, что позволяет им эффективно выполнять одну конкретную задачу.

**Уровень обработки и координации** (агенты-координаторы или обработчики) получает

и анализирует сырые данные, поступающие от агентов-сборщиков. На этом уровне выполняется предварительная обработка: фильтрация, агрегация, очистка, устранение шума и сжатие данных. Кроме того, агенты этого уровня координируют деятельность сборщиков, распределяя зоны ответственности и оптимизируя нагрузку в системе. В качестве примеров можно привести шлюзы (gateway) в IoT-сетях, серверы, управляющие роем дронов, или координационные центры, обеспечивающие согласованное функционирование распределенных компонентов системы.

**Уровень хранения и предоставления доступа** (агенты-хранилища или интерфейсные агенты) обеспечивает надежное и структурированное хранение уже обработанных данных. Эти агенты выполняют функции доступа к информации, отвечая на запросы пользователей или взаимодействующих систем. Их роль заключается в предоставлении релевантных данных в удобной форме и поддержании целостности информационного пространства. К типичным примерам относятся распределенные базы данных, реализованные, например, на основе блокчейн-технологий, децентрализованные файловые системы (IPFS), а также программные агенты, предоставляющие интерфейсы взаимодействия через API.

Коммуникация между агентами происходит через специальные языки коммуникации, например FIPA ACL (Agent Communication Language), где сообщения имеют определенную структуру (перформатив, отправитель, получатель, содержание) [5].

Можно выделить следующие ключевые преимущества MAS для этой задачи:

1. Масштабируемость. Новые агенты могут быть легко добавлены в систему без ее полной перестройки. Система может охватывать огромные географические области;

2. Отказоустойчивость и надежность. Отказ одного или нескольких агентов не приводит к коллапсу всей системы. Задачи могут быть динамически перераспределены между другими агентами;

3. Параллелизм и эффективность. Агенты работают параллельно, что значительно ускоряет сбор и обработку данных в больших объемах (например, мониторинг сети Интернет или большого склада);

4. Гибкость и адаптивность. Агенты могут реагировать на изменения в окружающей среде (новые источники данных, поломки, изменение приоритетов) и перестраивать свою работу;

5. Распределенность и автономность. Нет единой точки отказа. Данные могут собираться и обрабатываться на месте (на edge-устройствах), что снижает нагрузку на сеть и задержку.

Многоагентные системы предлагают радикально иной, децентрализованный подход к сбору и хранению информации по сравнению с классическими клиент-серверными моделями [6]. Они идеально подходят для задач, требующих масштабируемости, отказоустойчивости и работы в динамичных распределенных средах. Несмотря на трудности, связанные со сложностью проектирования и безопасностью, именно за MAS будущее в таких областях, как IoT, умные города, Web3 и автономные роботизированные системы.

В [7] предложен подход к разработке и оптимизации системы для сбора и анализа данных из социальных сетей (в частности, Twitter) с использованием распределенного краулера, встроенного в многоагентную систему (Multi-Agent System, MAS). Система предназначена для эффективного извлечения данных на основе ключевых слов.

При этом ключевыми технологиями и методами являются:

1. Веб-краулер. Программа, которая автоматически обходит веб-страницы, загружает их содержимое, извлекает текст и метаданные, а также находит новые ссылки для последующего обхода.

2. Многоагентная система. Иерархическая структура агентов, в которой:

- главный агент (Master Agent) управляет задачами, распределяет URL-адреса и координирует работу;
- агенты-краулеры загружают и анализируют содержимое веб-страниц.

3. Распределенные вычисления. Нагрузка распределяется между множеством агентов, что повышает производительность и отказоустойчивость системы.

Система использует иерархическую архитектуру (дерево агентов), что обеспечивает масштабируемость и балансировку нагрузки. Агенты

обмениваются сообщениями в формате XML с использованием TCP-сокетов. Сообщения могут шифроваться алгоритмом MD5. Поддерживается как распределенное (на нескольких компьютерах), так и локальное выполнение [8–10].

В развитие этой идеи можно выделить алгоритм веб-скрапинга с использованием мультиагентных систем, который отражает практическое применение описанных принципов. Алгоритм скрапинга (веб-скрапинга) с помощью MAC — это эффективный подход к сбору данных в сложных и динамичных условиях.

Классический скрапинг часто представляет собой единый централизованный скрипт. Мультиагентный подход заменяет его роем интеллектуальных агентов, каждый из которых выполняет свою специализированную задачу, координируясь с другими для достижения общей цели — эффективного и надежного сбора данных.

Обычно система состоит из нескольких типов агентов:

- агент-планировщик (Coordinator Agent);
- агент-сборщик (Crawler Agent);
- агент-парсер (Parser Agent);
- агент-обработчик (Data Handler Agent);
- агент — обходчик защиты (Anti-Block Agent).

Агент-планировщик получает целевую задачу (например, «собрать все товары с сайта X»), дробит задачу на подзадачи (списки категорий, страниц), распределяет URL между агентами-сборщиками, а также следит за общей очередью задач.

Агент-сборщик непосредственно загружает веб-страницы, обладает человекоподобным поведением (рандомизация задержек, соблюдение robots.txt), использует пул прокси для смены IP, обходит простые антибот-системы, передает загруженный HTML агенту-парсеру.

Агент-парсер извлекает структурированные данные из сырого HTML, содержит логику парсинга (XPath, CSS-селекторы, регулярные выражения), умеет адаптироваться к небольшим изменениям в верстке. Извлеченные данные передаются агенту-обработчику.

Агент-обработчик выполняет очистку, валидацию и сохранение данных, а также приводит их к единому формату. После проверки данных на полноту и корректность следует сохранение в БД, файл или отправка в очередь сообщений.

Функции агента — обходчика защиты — это решение капчи и обход сложных систем защиты (например, Cloudflare). Может использовать сервисы по распознаванию капч (например, Anti-Captcha, RuCaptcha). Анализирует ответы сервера на наличие JS-челленджей и сообщает другим агентам о необходимости изменить поведение. Этот агент может быть не у всех систем, но для сложных целей он критически важен.

На рис. 1 представлена обобщенная схема взаимодействия агентов, отражающая логику функционирования предложенной системы. Схема демонстрирует основные этапы обмена данными и распределения ролей между агентами.

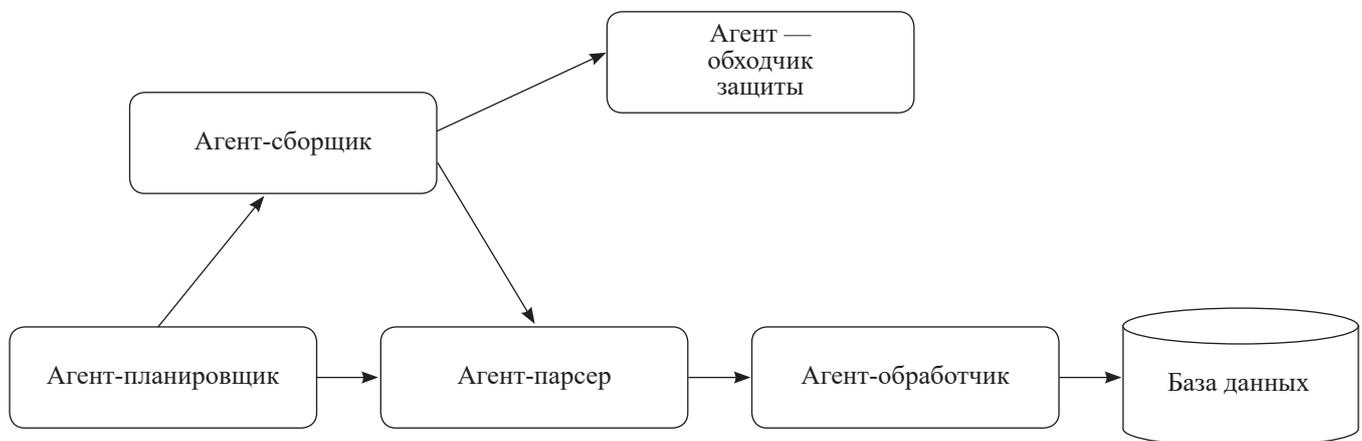


Рис. 1. Схема мультиагентной системы по сбору данных

На основе представленной схемы можно описать последовательность действий агентов в процессе работы системы. Алгоритм функционирования включает следующие этапы:

1. Инициализация входных данных. Формируются стартовые URL и конфигурационные параметры (глубина обхода, задержки, прокси).
2. Создание очереди задач. Агент-планировщик формирует первоначальную очередь на основе стартовых URL.
3. Распределение задач. Планировщик передает свободным агентам-сборщикам ссылки для обработки.
4. Загрузка страниц. Агент-сборщик получает страницу, используя прокси и соблюдая задержки. При возникновении ошибки (капча, код 403) задача передается агенту обхода защиты, после чего запрос повторяется.
5. Парсинг контента. Агент-сборщик передает HTML агенту-парсеру, который извлекает целевые данные и новые ссылки.
6. Обновление очереди. Найденные ссылки, удовлетворяющие фильтрам (тот же домен, допустимая глубина), передаются планировщику для добавления в очередь.
7. Сохранение данных. Агент-обработчик записывает структурированные данные в хранилище.

8. Завершение процесса. Алгоритм останавливается, когда очередь задач пуста и все агенты простаивают. Планировщик отправляет сигнал завершения.

## Заключение

В результате анализа можно сделать вывод, что применение мультиагентных систем в задачах веб-скрапинга представляет собой перспективное направление развития интеллектуальных технологий сбора данных. В отличие от традиционных централизованных решений мультиагентный подход обеспечивает масштабируемость, адаптивность и устойчивость к отказам, что особенно важно при работе с динамичными и защищенными веб-ресурсами. Иерархическая структура агентов позволяет эффективно распределять нагрузку, ускоряя процесс извлечения и обработки информации. Практическое использование подобных систем открывает возможности для построения децентрализованных платформ анализа данных, интегрирующих краулинг, обработку и хранение в едином информационном контуре. В дальнейшем развитие таких систем может быть связано с применением методов машинного обучения для интеллектуального управления агентами и повышением уровня автономности при взаимодействии со сложными веб-средами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Coughlin T. 175 Zettabytes By 2025 // Forbes. 2018. 27 November. URL: <http://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025> (дата обращения: 05.10.2025).
2. Barrett A. How to Scrape Websites at Large Scale // Octoparse Web Scraping Blog. 2022. 30 August. URL: <http://www.octoparse.com/blog/scrape-websites-at-large-scale> (дата обращения: 05.10.2025).
3. Jennings N.R., Wooldridge M.J. Applications of Intelligent Agents // Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets / N. R. Jennings, M. J. Wooldridge (eds). Heidelberg: Springer, 1998. Pp. 3–28. DOI: 10.1007/978-3-662-03678-5\_1.
4. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений / пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 544 с.
5. De Ridder A. An Introduction to FIPA Agent Communication Language: Standards for Interoperable Multi-Agent Systems // SmythOS AI Blog. URL: <http://smythos.com/developers/agent-development/fipa-agent-communication-language> (дата обращения: 22.11.2025).
6. Кияев В.И., Граничин О.Н. Информационные технологии в управлении предприятием: краткий учебный курс. 2-е изд., испр. М.: ИНТУИТ, 2016. 361 с.
7. The Data Extraction Using Distributed Crawler Inside the Multi-Agent System / K. Tomala [et al.] // Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2013. Vol. 11, no. 6. Pp. 455–460. DOI: 10.15598/aeec.v11i6.867.

8. Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition) — W3C Recommendation 26 November 2008 / T. Bray [et al.] (eds). URL: <http://www.w3.org/TR/xml> (дата обращения: 22.11.2025).

9. Transmission Control Protocol // Wikipedia. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission\\_Control\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol) (дата обращения: 22.11.2025).

10. MD5 // Wikipedia. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/MD5> (дата обращения: 22.11.2025).

Дата поступления: 29.11.2025

Решение о публикации: 09.02.2026

## Modern Multi-Agent Systems for Data Scraping

**Vladislav S. Blyum** — PhD in Engineering, Associate Professor of the Business Informatics and Management Department. Research interests: immunocomputing, artificial intelligence technologies. E-mail: [vladblum7@gmail.com](mailto:vladblum7@gmail.com)

**Andrey E. Lapshin** — 2nd year Master's Degree Student in 09.04.03 Applied Informatics. Research interests: data mining. E-mail: [andreyka.lapshin.2002@mail.ru](mailto:andreyka.lapshin.2002@mail.ru)

Institute of Entrepreneurship Technologies and Law, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Bolshaya Morskaya str., 67, lit. A, Saint Petersburg, 190000, Russia

**For citation:** Blyum V.S., Lapshin A.E. Modern Multi-Agent Systems for Data Scraping, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 16–22. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-16-22. (In Russian)

**Abstract.** *This paper examines the architecture of multi-agent systems (MAS), agent properties, communication features, and the applicability of this approach to web scraping tasks. The relevance of the study is determined by the rapid growth of data volumes on the Internet and the limitations of traditional centralized web scraping systems that encounter challenges related to scalability, blocking, and insufficient robustness against dynamic website changes. In this context, there is an increasing demand for decentralized architectures that adapt to evolving environments and efficiently collect vast quantities of information. One of the most promising approaches is the deployment of multi-agent systems, which enable distributed data collection, parallel processing, and resilient storage. **Purpose:** to develop and structure an approach for utilizing multi-agent systems in web scraping, as well as to describe a generalized algorithm that ensures scalable, fault-tolerant, and adaptive data collection. **Methods:** the study employs theoretical analysis of multi-agent system properties, architectural models, and inter-agent communication mechanisms; an examination of existing practical implementations of distributed web crawling; and the synthesis of a generalized algorithm constructed upon the identification of typical agent roles: scheduler, collector, parser, data processor, and protection bypass agent. **Results:** the findings reveal a three-tiered architecture for the multi-agent system, including levels for data collection, processing/coordinating, and storage. Key properties of agents are highlighted, demonstrating their distinct contributions to the scraping task. The functions of five types of agents used in distributed web scraping are presented, alongside a proposed interaction scheme illustrating their collaborative engagement. Based on the analysis of existing solutions, a generalized algorithm for distributed scraping has been formulated, reflecting the interaction of these specialized agents. This algorithm encompasses distinct stages: initialization, task distribution, page loading, error handling in blocking scenarios, content parsing, and data storage. The findings indicate that the multi-agent approach provides parallelism, scalability, fault tolerance, and flexibility,*

adapting to diverse web resources and evolving challenges. **Practical significance:** the results of this research can be used in the design of mass data collection systems, the construction of distributed web crawlers, and the creation of information analysis platforms based on multi-agent systems. The generalized algorithm can serve as the basis for implementing flexible and scalable systems capable of functioning effectively in the context of vast data volumes, dynamic web page alterations, and robust protective mechanisms. **Discussion:** this article describes the integration of multi-agent system properties and principles into web scraping processes, culminating in the formation of a unified generalized model of agent interaction. The presented algorithm mirrors the practical structure of a distributed crawler and demonstrates how different types of agents can coordinate, collect, analyze, and filter data when interacting with dynamic and secure web resources. The importance of decentralization and adaptability for modern web scraping is emphasized, particularly in scenarios constrained by anti-bot protection.

**Keywords:** multi-agent systems, scraping, scaling, proactivity, autonomy

## REFERENCES

1. Coughlin T. 175 Zettabytes By 2025, *Forbes*. Published online at November 27, 2018. Available at: <http://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025> (accessed: October 05, 2025).
2. Barrett A. How to Scrape Websites at Large Scale, *Octoparse Web Scraping Blog*. Published online at August 30, 2022. Available at: <http://www.octoparse.com/blog/scrape-websites-at-large-scale> (accessed: October 05, 2025).
3. Jennings N.R., Wooldridge M.J. Applications of Intelligent Agents. In: *Jennings N.R., Wooldridge M.J. (eds) Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*. Heidelberg, Springer, 1998, pp. 3–28. DOI: 10.1007/978-3-662-03678-5\_1.
4. Fowler M. Архитектура корпоративных программных приложений [Patterns of enterprise application architecture]. Moscow, Williams Publishing House, 2006, 544 p. (In Russian)
5. De Ridder A. An Introduction to FIPA Agent Communication Language: Standards for Interoperable Multi-Agent Systems, *SmythOS AI Blog*. Available at: <http://smythos.com/developers/agent-development/fipa-agent-communication-language> (accessed: November 22, 2025).
6. Kiyayev V.I., Granichin O.N. Информационные технологии в управлении предприятием: краткий учебный курс [Information Technology in Business Management: A Concise Educational Course]. Moscow, INTUIT, 2016, 361 p. (In Russian)
7. Tomala K., et al. The Data Extraction Using Distributed Crawler Inside the Multi-Agent System, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2013. Vol. 11, no. 6. Pp. 455–460. DOI: 10.15598/aeec.v11i6.867.
8. Bray T., et al. (eds) Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition) — W3C Recommendation 26 November 2008. Available at: <http://www.w3.org/TR/xml> (accessed: November 22, 2025).
9. Transmission Control Protocol, *Wikipedia*. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission\\_Control\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol) (accessed: November 22, 2025).
10. MD5, *Wikipedia*. Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/MD5> (accessed: November 22, 2025).

Received: 29.11.2025

Accepted: 09.02.2026

УДК 656.073

## YOLOv11 для радиографического неразрушающего контроля сварных соединений

**Бреht Эдуард Александрович**

— аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы». Научные интересы: нейронные сети, компьютерное зрение, неразрушающий контроль. E-mail: ed.breht@mail.ru

**Коншина Вера Николаевна**

— канд. техн. наук, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы». Научные интересы: методы неразрушающего контроля, статистический анализ, достоверность контроля. E-mail: vera.konshina@gmail.com

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

**Для цитирования:** Бреht Э. А., Коншина В. Н. YOLOv11 для радиографического неразрушающего контроля сварных соединений // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 23–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-23-32

**Аннотация.** Представлено исследование о применении модели нейронной сети YOLOv11 при радиографическом контроле. **Цель:** обоснование возможности применения YOLOv11 для автоматического обнаружения и визуализации дефектов на рентгенографических снимках сварных соединений. **Методы:** анализ современных инструментов и технологий, включая нейронные сети, а также представительные выборки порядка 100 размеченных изображений с различными типами дефектов и индикаторами качества изображения, дополненная аугментацией и предварительной фильтрацией снимков. **Результаты:** показано, что за счет использования усовершенствованного Backbone с модулями C3k2 и блока пространственного внимания C2PSA модель обеспечивает высокие значения показателей mAP@0,5–0,95 и уверенно распознает как крупные, так и слабоконтрастные малые дефекты при приемлемом времени обработки одного изображения. **Практическая значимость:** состоит в возможности интеграции YOLOv11 в действующие системы неразрушающего контроля сварных швов.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, рентгенографический контроль, дефектограммы, распознавание

**1.2.1** — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

### Введение

В настоящее время задачи неразрушающего контроля сварных соединений все чаще решаются методами компьютерного зрения на основе сверточных нейронных сетей, в том числе моделями архитектуры YOLO [1]. Целью статьи является демонстрация применения модели YOLOv11 для автоматического обнаружения дефектов и индикаторов качества изображения (ИКИ) на рентгеновских снимках сварных швов, а также сравнение ее характеристик с предыдущими версиями [2, 3].

### Архитектура YOLO

Модели YOLOv11 сохраняют классическую одношаговую схему распознавания, но используют усовершенствованный Backbone и Neck [1], включающие блоки C3k2 и модуль C2PSA с пространственным вниманием (рис. 1). Это позволяет эффективнее выделять тонкие структуры и слабоконтрастные области, что особенно важно при анализе рентгенограмм с малозаметными протяженными дефектами [4].

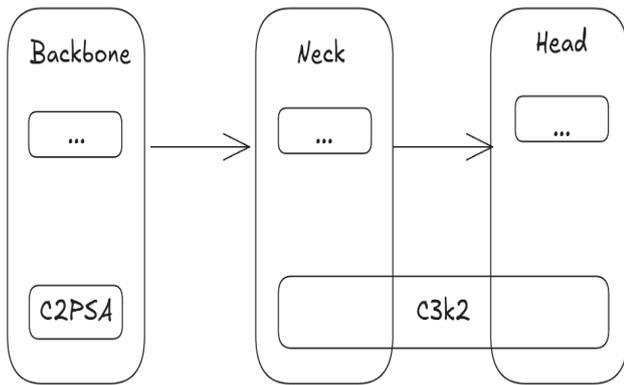


Рис. 1. Общая схема размещения модифицированных модулей в слоях нейронной сети YOLO

В контексте представленной схемы Backbone можно понимать как «зрительную систему» модели: он последовательно преобразует исходное изображение в набор все более абстрактных признаков, а завершающий его модуль C2PSA учится расставлять акценты внутри этих карт признаков, усиливая именно те участки, где могут скрываться дефекты металла. Neck выступает связующим звеном между Backbone и Head (головой модели): он собирает признаки разных масштабов и прогоняет их через блоки C3k2, которые, как умные фильтры, отбрасывают лишний шум и подчеркивают важные контуры, делая будущие рамки объектов более устойчивыми даже при низком контрасте снимка.

Наконец, Head работает уже с очищенными и обогащенными признаками и для каждой обла-

сти изображения выдает понятные человеку результаты: координаты рамки, класс обнаруженного дефекта и степень уверенности модели. В практическом плане это означает, что для инженера-дефектоскописта сложная внутренняя архитектура YOLO11 сводится к более надежному обнаружению длинных трещин и непроваров на рентгенограммах без необходимости ручного поиска едва заметных артефактов [5].

Существенной особенностью современной архитектуры YOLOv11 является многомасштабная обработка изображений: Backbone и Neck формируют несколько уровней карт признаков с разным пространственным разрешением, а Head одновременно анализирует их для поиска как крупных, так и очень мелких объектов. Такая организация особенно важна для рентгенографического контроля сварных швов, где на одном снимке присутствуют и протяженные зоны непровара, и точечные поры, а разница в их размерах может составлять порядок и более [5]. За счет улучшенного слияния признаков в Neck и использования модулей внимания, модель лучше «видит» слабоконтрастные дефекты, не теряя при этом контекст.

Далее рассмотрим, как указанные нововведения повлияли на работоспособность в сравнении с более старыми версиями (рис. 2) [2].

По сравнению с YOLOv8 вариант YOLOv11 достигает более высокой средней точности на на-

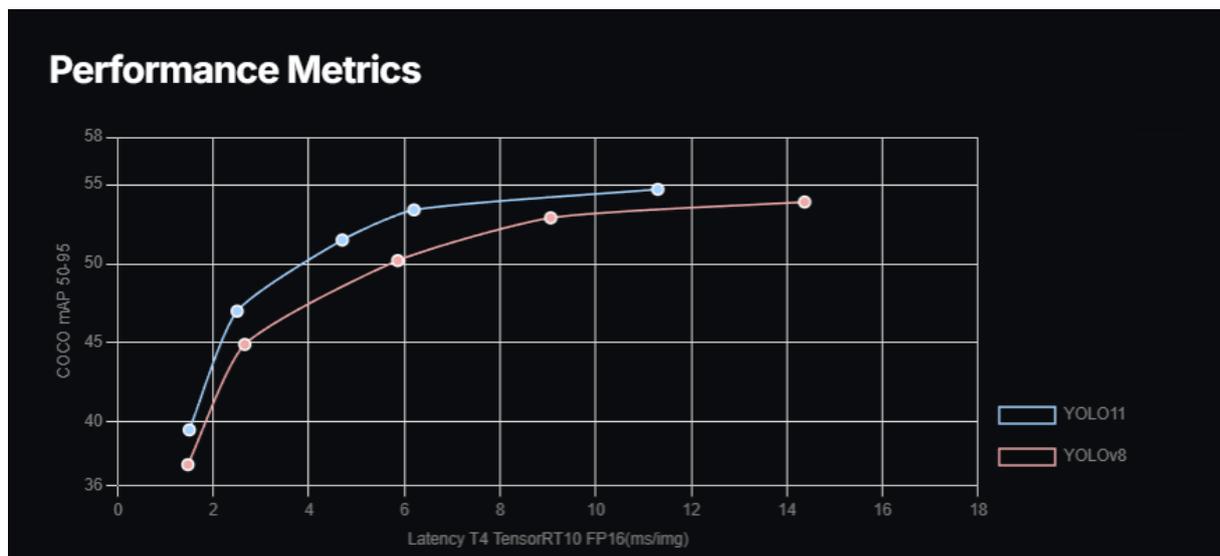


Рис. 2. Сравнение эффективности нейронных сетей

боре COCO (набор данных для сравнения эффективности) при снижении числа параметров [6] примерно на 22%, что упрощает развертывание на вычислительно ограниченных системах. Модель поддерживает единый интерфейс для задач распознавания, сегментации и ориентированных ограничивающих прямоугольников, что позволяет при необходимости расширять систему контроля.

Из недостатков можно отметить некоторое увеличение вычислительной нагрузки по сравнению с более ранними версиями архитектуры. В частности, дополнительные модули внимания требуют большего числа операций, что приводит к увеличению времени обработки одного изображения на тех же программно-аппаратных ресурсах. При развертывании в условиях ограниченных вычислительных мощностей (например, на рабочих станциях дефектоскопистов без специализированных ускорителей) данный фактор необходимо учитывать при выборе варианта модели и настроек решения входных рентгенограмм.

### Математическая постановка задачи

Рассматривается задача обнаружения на изображении множества объектов (дефектов сварного шва и ИКИ), для каждого из которых требуется определить класс  $c$  и координаты ограничивающего прямоугольника  $b = (x, y, w, h)$  в нормированных координатах изображения.

Модель YOLO11 аппроксимирует неизвестное отображение:

$$I \rightarrow \{(b_i, c_i, s_i)\}_{i=1}^N,$$

где  $I$  — входное изображение,  $N$  — количество обнаруженных объектов,  $s_i \in [0, 1]$  — степень уверенности в наличии объекта данного класса.

Качество предсказанного прямоугольника оценивается при помощи метрики пересечения-объединения (Intersection over Union, IoU) для предсказанного бокса  $B_p$  и истинного бокса  $B_t$ :

$$\text{IoU}(B_p, B_t) = \frac{|B_p \cap B_t|}{|B_p \cup B_t|}.$$

В современных реализациях YOLO для регрессии координат используется модифицированная

IoU-функция потерь, например, CIoU, которая дополнительно учитывает расстояние между центрами прямоугольников и различие их сторон; это позволяет быстрее и точнее подстраивать рамки к дефектам сварного шва.

Общая функция потерь при обучении модели YOLOv11 может быть представлена в виде суммы четырех слагаемых:

$$\mathcal{L} = \lambda_{\text{box}} \mathcal{L}_{\text{box}} + \lambda_{\text{cls}} \mathcal{L}_{\text{cls}} + \lambda_{\text{obj}} \mathcal{L}_{\text{obj}} + \lambda_{\text{DFL}} \mathcal{L}_{\text{DFL}},$$

где  $\mathcal{L}_{\text{box}}$  отвечает за точность координат боксов (на основе IoU/CIoU),  $\mathcal{L}_{\text{cls}}$  и  $\mathcal{L}_{\text{obj}}$  — за правильность класса и факт наличия объекта, а  $\mathcal{L}_{\text{DFL}}$  (Distribution Focal Loss) уточняет положение границ, обучая модель предсказывать распределение вероятностей по дискретным позициям для каждой координаты. Такая комбинация особенно полезна при работе с рентгенограммами, где границы дефектов размыты, а небольшое смещение рамки приводит к заметному падению IoU [7].

После получения набора «сырых предсказаний»  $\{(b_i, c_i, s_i)\}$  на каждом уровне признаков применяется процедура подавления немаксимумов (Non-Maximum Suppression, NMS). Алгоритм последовательно выбирает бокс с максимальным значением  $s_i$ , оставляет его как итоговое обнаружение и удаляет все боксы того же класса, для которых IoU с выбранным боксом превышает заданный порог  $\tau$ . В результате множество перекрывающихся рамок над одним и тем же дефектом сводится к одной наиболее надежной, что упрощает последующую интерпретацию результатов дефектоскопистом.

Для оценки качества распознавания дефектов используются стандартные метрики точности (Precision), полноты (Recall) и средней точности (mean Average Precision, mAP) [7]. Пусть TP — число правильно обнаруженных дефектов, FP — число ложных срабатываний, а FN — число пропущенных дефектов; тогда:

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

Точность показывает, какая доля всех выданных моделью срабатываний действительно соответствует реальным дефектам (важно для снижения

числа лишних проверок), а полнота отражает, какая доля существующих дефектов была найдена (критично с точки зрения безопасности эксплуатации сварных соединений). При варьировании порога уверенности модели строится кривая «точность — полнота» (Precision–Recall curve), по площади под которой вычисляется величина Average Precision (AP) для каждого класса объектов [7]. Подобная кривая соотношения между вероятностью правильного обнаружения и вероятностью перебраковки применялась ранее при оценке достоверности результатов НК (ROC-анализ) [8]. Средняя по всем классам величина mAP определяется как

$$mAP = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C AP_c,$$

где  $C$  — число классов,  $AP_c$  — средняя точность для класса  $c$ .

В статье основное внимание уделяется значениям  $mAP@0,5$  и  $mAP@0,5-0,95$ , рассчитываемым при различных порогах пересечения рамок по IoU.

Описанная постановка задачи и структура функции потерь реализуются в рамках модели YOLOv11, обучаемой на размеченных рентгеновских изображениях сварных соединений. Ниже приведены используемые в работе данные и принятая методика обучения модели на этих изображениях.

### Материалы и методика исследования

Для обучения и тестирования модели YOLOv11 использовалась выборка рентгеновских изображений сварных швов, включающая как реально обнаруженные дефекты (рис. 3–4) [9], так и заведомо бездефектные участки. На каждом снимке вручную размечались ограничивающие прямоугольники для дефектов различных типов (поры, непровары, трещины и др. [5]), а также для ИКИ, что позволяло одновременно контролировать качество экспозиции и корректность работы алгоритма.

Выборка была разделена на обучающее, валидационное и тестовое подмножества в пропорциях, обеспечивающих достаточное количество примеров каждого типа дефекта в тренировке

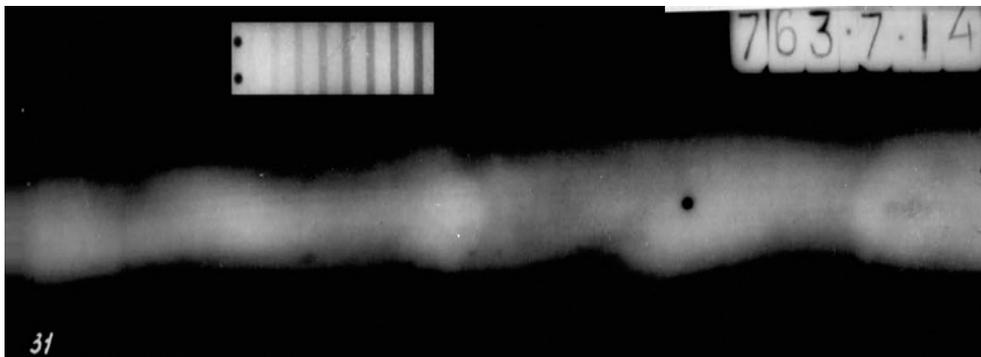


Рис. 3. Пример радиографического снимка с дефектом

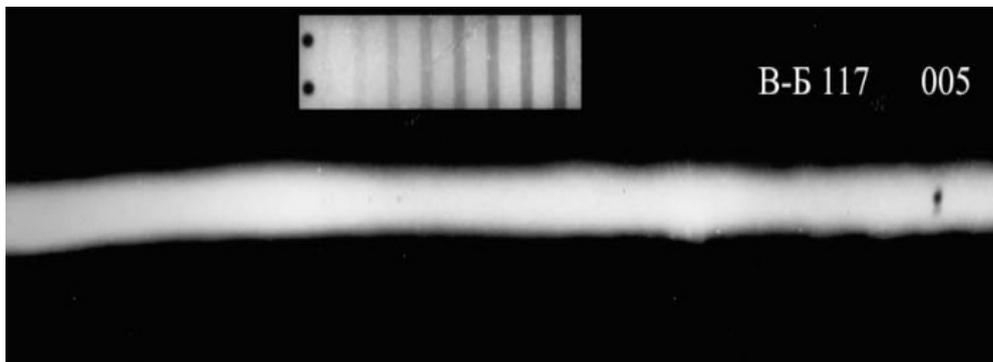


Рис. 4. Пример радиографического снимка без дефекта

и независимой проверке. Изображения нормировались по размеру (например, до  $640 \times 640$  пикселей) и проходили стандартные аугментации — повороты, сдвиги и изменения яркости/контраста в пределах, не искажающих физический смысл рентгенограммы.

Для уменьшения влияния артефактов рентгенографической пленки предварительно выполнялась фильтрация изображений: удаление границ пленки и служебных меток, легкое сглаживание высокочастотного шума, а также выравнивание гистограммы яркости в области шва. При разметке дополнительно фиксировались случаи частичного перекрытия дефектов и участки с неоднородной толщиной металла, что позволяло в дальнейшем отдельно анализировать работу модели на наиболее сложных примерах.

Для обучения использовалась модель YOLOv11m, реализованная в библиотеке Ultralytics, с размером входного изображения  $640 \times 640$  пикселей и размером пачки 16 (количество изображений за один проход), выбранным исходя из объема доступной видеопамати (как правило, 8–16 изображений на шаг). Обучение проводилось в течение 50 эпох с оптимизатором SGD или AdamW, начальному уровню обучения назначался порядок  $10^{-3}$

с косинусным или степенным уменьшением, а лучшие веса выбирались по максимальному значению  $mAP@0,5$  на валидационной выборке.

В процессе тренировки использовались встроенные в фреймворк аугментации YOLOv11 (масштабирование, случайные сдвиги и горизонтальные отражения), дополненные ограниченной фотометрической перестройкой яркости и контраста, адаптированной под специфику рентгенограмм. Для предотвращения переобучения применялись ранняя остановка по плато валидационной ошибки и L2-регуляризация весов, что позволило сохранить обобщающую способность модели при сравнительно небольшом объеме данных.

### Результаты обучения модели

Качество работы модели оценивалось как по интегральным метрикам (Precision, Recall,  $mAP@0,5$ ,  $mAP@0,5-0,95$ ), так и по динамике отдельных компонент функции потерь на обучающей и валидационной выборках.

На рис. 5 показана динамика обучения модели YOLOv11: в верхнем ряду приведены значения функции потерь по координатам боксов, классам и DFL-компоненте для обучающей выборки, а также рост точности и полноты распознавания

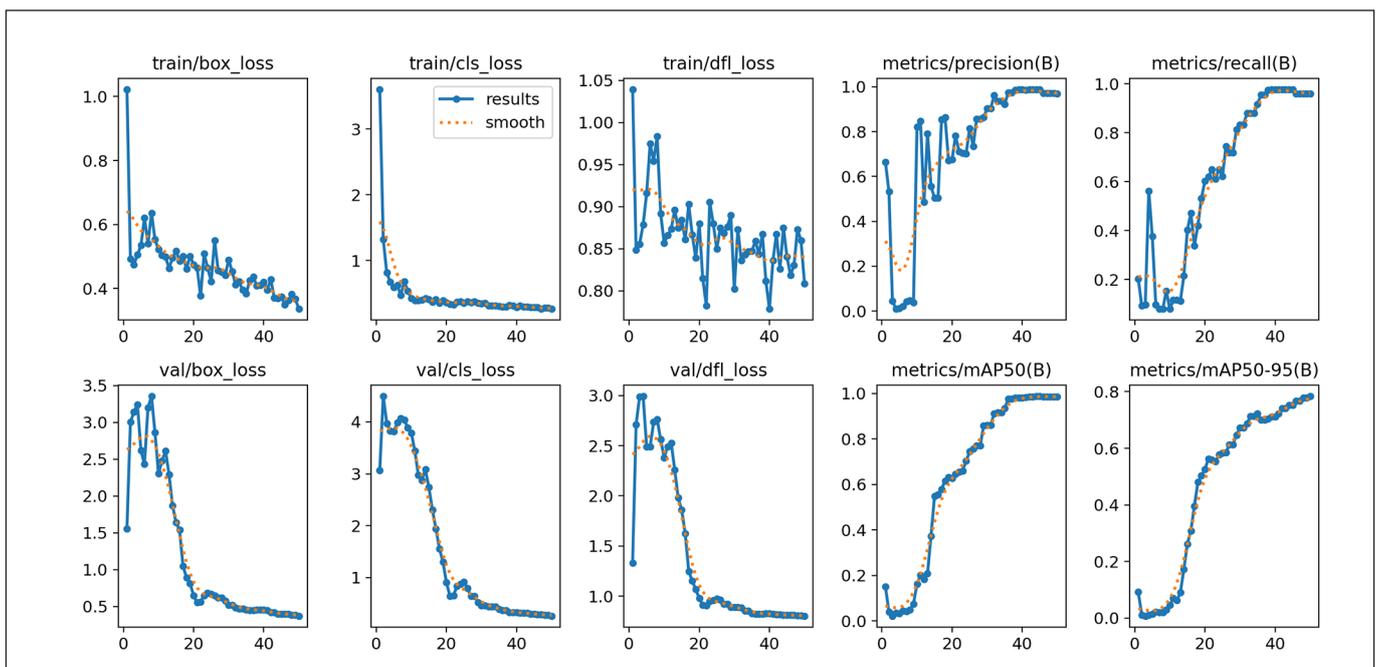


Рис. 5. Графики с основными метриками качества обученной модели

по эпохам. Постепенное снижение всех трех видов потерь и одновременное увеличение Precision и Recall свидетельствуют о том, что модель последовательно улучшает как положение рамок, так и отнесение их к правильному классу дефектов без признаков «развала» обучения.

Нижний ряд иллюстрирует поведение тех же показателей на валидационной выборке: после начального периода колебаний величины box-, cls- и DFL-потерь устойчиво уменьшаются, а метрики mAP@0,5 и mAP@0,5–0,95 монотонно растут и выходят на плато к концу обучения. Это говорит о хорошем согласовании модели с невидимыми ранее данными и отсутствии существенного переобучения, что особенно важно для задач неразрушающего контроля, где необходимо надежно обобщать результаты на новые рентгенограммы сварных соединений.

С практической точки зрения важен не только рост интегральных метрик, но и визуальное поведение модели на отдельных рентгеновских снимках. При выбранных параметрах обучения YOLOv11 уверенно обнаруживает как протяжен-

ные зоны непровара, так и мелкие поры, корректно отделяя их от фоновых неоднородностей и артефактов пленки; при этом границы рамок хорошо совпадают с экспертной разметкой, что подтверждается высокими значениями mAP@0,5–0,95.

На рис. 6 приведен пример работы разработанной нейронной сети по распознаванию дефекта (пора размером  $3 \times 2,5$  мм) и ИКИ на рентгеновском снимке. Видно, что модель уверенно идентифицирует оба объекта и формирует для них точные ограничивающие рамки, корректно отделяя дефект от фоновых неоднородностей и артефактов пленки.

Ниже представлен еще один пример работы нейронной сети, иллюстрирующий ее поведение на рентгенограмме с крупным дефектом и ИКИ. На рис. 7 видно, что модель корректно выделяет ИКИ и дефект (шлаковое включение размером  $7 \times 5$  мм). Формирует устойчивые ограничивающие рамки даже при значительной протяженности дефектной области.

Для того чтобы окончательно убедиться в эффективности работы нейронной сети, далее рассматри-

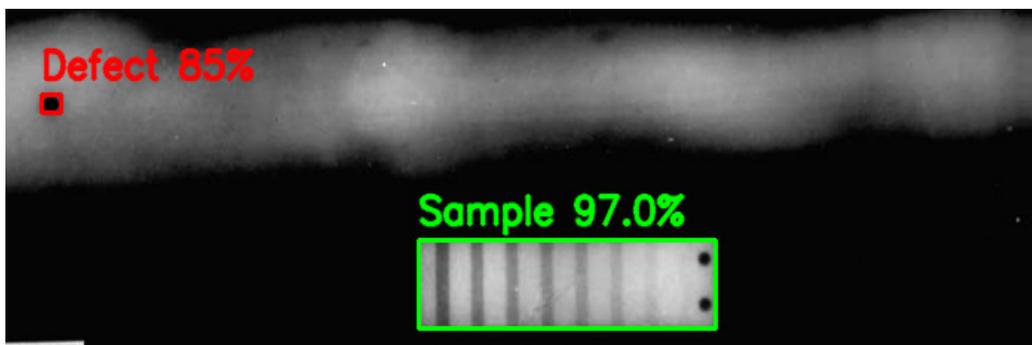


Рис. 6. Пример распознавания дефекта и ИКИ

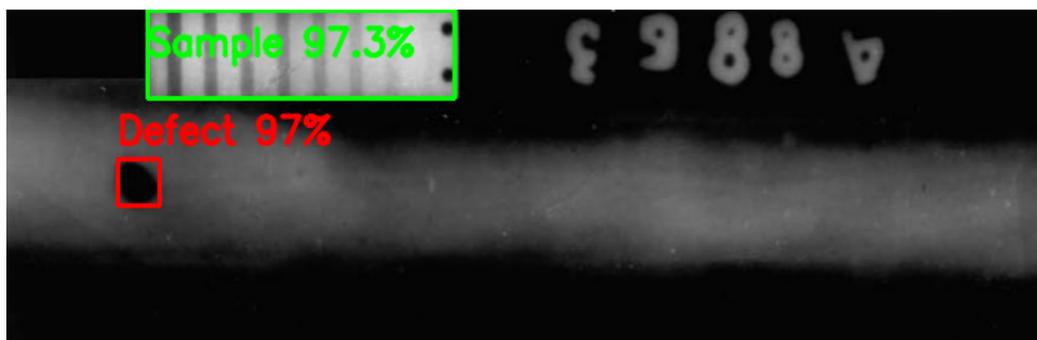


Рис. 7. Пример распознавания крупного дефекта и ИКИ

вается пример небольшого дефекта с пониженным контрастом относительно основного металла (дефект типа «пора» диаметром 1,5 мм). На рис. 8 представлено исходное радиографическое изображение с едва заметным дефектом, а на рис. 9 — результат работы модели, демонстрирующий уверенное распознавание как дефекта, так и ИКИ при сохранении точного позиционирования рамок.

Как видно из рисунков 6–9, обученная модель надежно обнаруживает дефекты различных размеров и контрастности, что снижает риск пропуска опасных нарушений сплошности при приемлемом количестве ложных срабатываний. В условиях реальной эксплуатации это позволяет использовать YOLOv11 как инструмент первичного автоматизированного скрининга рентгенограмм с последующим подтверждением результатов оператором, разгружая дефектоскописта от монотонного просмотра большого числа снимков.

Отдельно стоит подчеркнуть, что даже на малой выборке из порядка 100 изображений YOLOv11 демонстрирует заметный прирост качества по сравнению с более ранними версиями архитекту-

ры, используемыми в предыдущих работах [10]: достигается более высокая полнота при сопоставимой точности, а время обработки одного снимка остается достаточным для применения в режиме, близком к реальному времени. Это позволяет рассматривать данную модель как базу для дальнейшего наращивания датасета и внедрения дополнительных улучшений, например ориентированных рамок или сегментации контуров дефектов [11].

С точки зрения пользователя системы неразрушающего контроля ключевым параметром является вероятность пропуска опасного дефекта при допустимом количестве ложных срабатываний [12]. Высокие значения полноты и mAP при умеренной величине функции потерь при валидации показывают, что YOLOv11 надежно выявляет большинство дефектов даже при обучении на ограниченном числе рентгенограмм, что снижает риск недобраковки или перебраковки объектов контроля.

В то же время форма кривых Precision и Recall позволяет подобрать такие пороги уверенности и параметры NMS, при которых число «лишних» рамок остается приемлемым для дефектоскописта

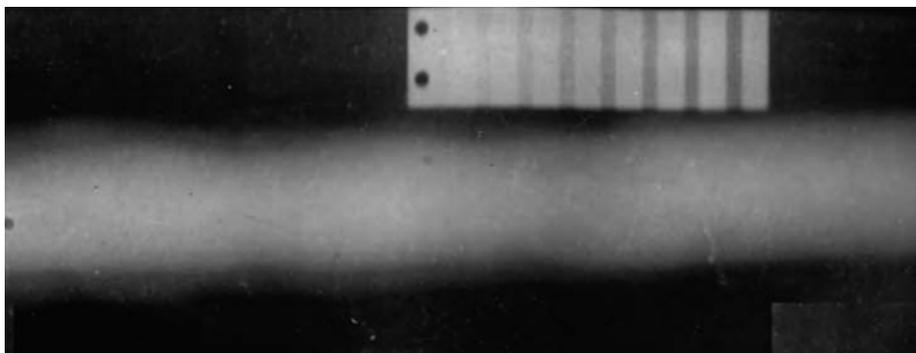


Рис. 8. Пример радиографического изображения с дефектом типа «пора» диаметром 1,5 мм



Рис. 9. Пример распознавания небольшого дефекта и ИКИ

и не перегружает интерфейс системы. Это дает возможность адаптировать модель под разные сценарии применения: от максимально чувствительного первичного скрининга до более жесткого режима подтверждения дефектов перед оформлением заключения.

### Заключение

Выполненные эксперименты показали, что модель YOLOv11 с усовершенствованным Backbone, включающим модули C3k2 и блок пространственного внимания C2PSA, обеспечивает высокое качество автоматического обнаружения дефектов на рентгеновских снимках сварных соединений даже при обучении на относительно небольшой выборке — порядка 100 изображений. Это выражается в устойчивом снижении значений функций потерь на обучающей и валидационной выборках, росте метрик mAP@0,5–0,95 и высокой согласованности предсказаний с экспертной разметкой, что подтверждает пригодность модели для использования в задачах практического неразрушающего контроля.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что YOLOv11 способна надежно обнаруживать как протяженные зоны, так и малые сла-

боконтрастные дефекты при приемлемом времени обработки одного рентгеновского снимка. Это позволяет рассматривать разработанную модель как основу для интеграции в существующие рабочие места дефектоскопистов в качестве модуля автоматизированного первичного скрининга, а также для последующего анализа архивных изображений с целью повышения полноты выявления опасных дефектов.

Перспективными направлениями дальнейшей работы являются расширение объема обучающих данных за счет включения новых типов сварных соединений и режимов рентгенографического контроля, а также адаптация архитектуры под специализированные задачи: использование ориентированных ограничивающих прямоугольников для более точного описания протяженных трещин, внедрение сегментации контуров дефектов и комбинирование YOLOv11 с методами статистического анализа для выработки автоматизированных критериев браковки. Дополнительным шагом может стать исследование производительности облегченных вариантов модели на ограниченных вычислительных платформах, применяемых в промышленных системах.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Khanam R., Hussain M. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements // ArXiv. 2024. Vol. 2410.17725. 9 p. DOI: 10.48550/arXiv.2410.17725.
2. Ultralytics YOLO11. URL: <http://docs.ultralytics.com/models/yolo11> (дата обращения: 01.12.2025).
3. Ultralytics YOLO11. Model Card. URL: <http://huggingface.co/Ultralytics/YOLO11> (дата обращения: 01.12.2025).
4. Research on Object Detection and Recognition in Remote Sensing Images Based on YOLOv11 / L.-H. He [et al.] // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 14032. 25 p. DOI: 10.1038/s41598-025-96314-x.
5. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. 4 е изд., перераб. СПб.: СВЕН, 2014. 312 с.
6. Kotthapalli M., Ravipati D., Bhatia R. YOLOv1 to YOLOv11: A Comprehensive Survey of Real-Time Object Detection Innovations and Challenges // ArXiv. 2025. Vol. 2508.02067. 13 p. DOI: 10.48550/arXiv.2508.02067.
7. Maity A., Ghosh T. Comparative Analysis of Object Detection Algorithms for Surface Defect Detection // ArXiv. 2025. Vol. 2510.21811. 14 p. DOI: 10.48550/arXiv.2510.21811.
8. Применение показателей достоверности для валидации методик неразрушающего контроля / Г. Я. Дымкин, В. Н. Коншина, К. Нокеманн, Г.-Р. Тиллак // Дефектоскопия. 2000. № 3. С. 75–84.
9. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод = Nondestructive testing. Welded joints. Radiography method: межгосударственный стандарт: введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 декабря 1982 г. № 4923: дата введения: 1984-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 19 с.

10. Брехт Э. А., Коншина В. Н. Применение нейронной сети YOLO для распознавания дефектов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. № 2 (30). С. 41–47. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-230-41-47.
11. Pan K., Hu H., Gu P. WD-YOLO: A More Accurate YOLO for Defect Detection in Weld X-ray Images // Sensors. 2023. Vol. 23, iss. 21. Art. 8677. 16 p. DOI: 10.3390/s23218677.
12. ГОСТ 33514–2015. Продукция железнодорожного назначения. Правила верификации методик неразрушающего контроля = Railway application. Verification of nondestructive testing techniques. межгосударственный стандарт: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 октября 2015 г. № 1662-ст: дата введения: 2016-08-01. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.

Дата поступления: 01.02.2026

Решение о публикации: 07.02.2026

## YOLOv11 for Radiographic Non-Destructive Testing of Welded Joints

**Eduard A. Brekht** — Postgraduate Student of the Mechanical Handling and Road Building Machines Department. Research interests: neural networks, computer vision, non-destructive testing. E-mail: ed.breht@mail.ru

**Vera N. Konshina** — PhD in Engineering, Associate Professor of the Mechanical Handling and Road Building Machines Department. Research interests: non-destructive testing methods, statistical analysis, reliability of testing. E-mail: vera.konshina@gmail.com

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

**For citation:** Brekht E.A., Konshina V.N. YOLOv11 for Radiographic Non-Destructive Testing of Welded Joints, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 23–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-23-32. (In Russian)

**Abstract.** *This study presents the application of the YOLOv11 neural network model in radiographic inspection. Purpose: to substantiate the feasibility of employing YOLOv11 for the automatic detection and visualization of defects in radiographic images of welded joints. Methods: the analysis of contemporary tools and techniques, including neural networks, alongside a representative dataset of approximately 100 annotated images, featuring various defect types and image quality indicators, supplemented by augmentation and pre-filtering of the images. Results: it has been demonstrated that the utilization of an enhanced Backbone with C3k2 modules and a C2PSA spatial attention block can enable the model to achieve high values of mAP@0.5–0.95, reliably detecting both large and low-contrast small defects while maintaining acceptable per-image processing times. Practical significance: the results indicate the potential for integrating YOLOv11 into existing non-destructive testing systems for welded joints.*

**Keywords:** *neural network, radiographic testing, defectograms, detection*

### REFERENCES

1. Khanam R., Hussain M. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements, *ArXiv*, 2024, vol. 2410.17725, 9 p. DOI: 10.48550/arXiv.2410.17725.

2. Ultralytics YOLO11. Available at: <http://docs.ultralytics.com/models/yolo11> (accessed: December 01, 2025).
3. Ultralytics YOLO11. Model Card. Available at: <http://huggingface.co/Ultralytics/YOLO11> (accessed: December 01, 2025).
4. He L.-H., et al. Research on Object Detection and Recognition in Remote Sensing Images Based on YOLOv11, *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. no. 14032, 25 p. DOI: 10.1038/s41598-025-96314-x.
5. Kretov E. F. Ultrazvukovaya defektoskopiya v energomashinostroyeni [Ultrasonic Flaw Detection in Power Machine Engineering]. Saint Petersburg, SVEN Publishing House, 2014, 312 p. (In Russian)
6. Kotthapalli M., Ravipati D., Bhatia R. YOLOv1 to YOLOv11: A Comprehensive Survey of Real-Time Object Detection Innovations and Challenges, *ArXiv*, 2025, vol. 2508.02067, 13 p. DOI: 10.48550/arXiv.2508.02067.
7. Maity A., Ghosh T. Comparative Analysis of Object Detection Algorithms for Surface Defect Detection, *ArXiv*, 2025, vol. 2510.21811, 14 p. DOI: 10.48550/arXiv.2510.21811.
8. Dymkin G. Ya., Konshina V.N., Nockemann C., Tillack G.-R. Primenenie pokazateley dostovernosti dlya validatsii metodik nerazrushayushchego kontrolya [A Using Confidence Ratings in Validation of Nondestructive Testing Techniques], *Defektoskopiya [Russian Journal of Nondestructive Testing]*, 2000, no. 3, pp. 75–84. (In Russian)
9. GOST 7512–82. Kontrol nerazrushayushchiy. Soedineniya svarnye. Radiograficheskiy metod [GOST 7512–82. Nondestructive testing. Welded joints. Radiography method]. Effective from January 01, 1984. Moscow, StandartInform Publishing House, 2008, 19 p. (In Russian)
10. Breht E.A., Konshina V.N. Primenenie neyronnoy seti YOLO dlya raspoznavaniya defektov [Application of YOLO Neural Network for Defect Recognition], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2022, no. 2 (30), pp. 41–47. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-230-41-47. (In Russian)
11. Pan K., Hu H., Gu P. WD-YOLO: A More Accurate YOLO for Defect Detection in Weld X-ray Images, *Sensors*, 2023, vol. 23, iss. 21, art. no. 8677, 16 p. DOI: 10.3390/s23218677.
12. GOST 33514–2015. Produktsiya zheleznodorozhnogo naznacheniya. Pravila verifikatsii metodik nerazrushayushchego kontrolya [GOST 33514–2015. Railway application. Verification of nondestructive testing techniques]. Effective from August 01, 2016. Moscow, StandartInform Publishing House, 2008, 16 p. (In Russian)

Received: 01.02.2026

Accepted: 07.02.2026

УДК 004.8

## Перспективы использования больших языковых моделей искусственного интеллекта на транспорте

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

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

**Для цитирования:** Тюгашев А. А. Перспективы использования больших языковых моделей искусственного интеллекта на транспорте // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 33–40. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-33-40

**Аннотация.** *Анализируются перспективы использования больших языковых моделей (БЯМ), таких как GPT-5.2 и Gemini 3, в транспортной отрасли посредством применения в проектировании транспортных средств, автономной навигации, управлении движением и пр. Особое внимание уделяется генерации с дополненной выборкой и мультимодальной обработке. Среди ключевых обсуждаемых проблем — сертификация безопасности, прозрачность моделей и этические аспекты их внедрения. **Цель:** определить перспективы использования ИИ-агентов на основе БЯМ в транспортной отрасли. **Результаты:** рассмотрены использование генерации с дополненной выборкой и многомодальная обработка данных, а также примеры, включая управление светофорами с помощью ИИ, генерацию сценариев моделирования и анализ усталости водителей. **Теоретическая значимость:** сделан вывод о неизбежности синергии ИИ и транспорта для повышения безопасности и эффективности. Предполагается, что БЯМ будут играть важную роль в будущих интеллектуальных адаптивных транспортных системах.*

**Ключевые слова:** *большие языковые модели, транспорт, интеллектуальные агенты, предиктивное техобслуживание, генеративное проектирование, критические системы*

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

### Введение

XX век часто называли космическим веком или веком информатики. Но можно отметить и стремительное развитие транспорта. В Советском Союзе основные железнодорожные линии были электрифицированы в 1950-х годах. Паровозы уступили место более совершенным локомотивам, появились электровозы и дизельные локомотивы. Что касается внедрения вычислительной техники, компьютеры использовались для управления сложными системами, оптимизации маршрутов,

расписаний и т. д. Сейчас, в XXI веке, мы наблюдаем масштабные программы модернизации транспортной инфраструктуры. Россия развивает высокоскоростные железнодорожные линии, строит новые автомагистрали. Китай добился больших успехов в создании высокоскоростных железнодорожных линий. Европа совершенствует интермодальные перевозки [1].

Информационные технологии, цифровизация и цифровая трансформация признаны

стратегическими приоритетами руководством многих стран. Тем временем с конца 2022 года в ИТ-сфере разворачивается революция искусственного интеллекта (ИИ). Это связано прежде всего с впечатляющим успехом больших языковых моделей (БЯМ), основанных на архитектуре генеративного предварительно обученного трансформера многослойных искусственных нейронных сетей. Сейчас ясно, что Китай и США лидируют в гонке ИИ. Американские GPT-5.2, Gemini 3 и Grok 4 конкурируют с китайскими DeepSeek V3, Qwen3-Max и Kimi K2. Российские разработки также существуют: GigaChat и Yandex GPT демонстрируют конкурентоспособные результаты.

Синергия искусственного интеллекта и транспорта способна открыть новую эру интеллектуальной мобильности. С момента заложения основополагающих концепций ИИ в 1950-х годах эта область неуклонно развивалась от систем, основанных на правилах, к созданию сложных интеллектуальных агентов, способных работать автономно. На транспорте это выразилось в передовых системах помощи водителю, прототипах автономных транспортных средств, интеллектуальном управлении дорожным движением и логистикой.

Языковые модели — это генеративные системы, способные писать тексты на разные темы по запросу пользователя. Возможности языковых моделей быстро растут. К началу 2026 года ИИ может успешно создавать программное обеспечение размером до 10–15 тыс. строк, писать научные статьи, рецензировать публикации и т. п. То, что еще пару лет назад казалось невозможным, становится обычным явлением. Говорят уже даже о создании и применении команд интеллектуальных агентов, способных выполнять определенную роль по запросу пользователя, взаимодействуя друг с другом и с окружающей средой как в виртуальной среде, так и потенциально в физическом мире [2].

Все это знаменует собой переход от прикладного ИИ, ориентированного на конкретные задачи, к агентам, способным рассуждать, планировать и выполнять сложные последовательности действий в замкнутом цикле восприятия, обучения и управления. Их интеграция в транспортную от-

расль обещает преодолеть разрыв между операторами-людьми и сложной техникой, автоматизировать сложные процессы проектирования, обеспечить новый уровень прогнозного интеллекта для технического обслуживания и эксплуатации.

Цель статьи — представить структурированный анализ текущего состояния, имеющихся проблем и перспектив применения интеллектуальных агентов на основе БЯМ в транспортной отрасли, опираясь на академические источники, иллюстрирующие, как данные технологии способствуют инновациям [3].

## Дискуссия

Применение языковых моделей в транспортной сфере многогранно и способно затронуть практически полный жизненный цикл транспортных средств и инфраструктуры. Их основная ценность заключается в способности учесть огромные объемы технических знаний и применить их к решению различных задач с беспрецедентной скоростью и масштабом [4].

### *Генеративное проектирование*

Языковые модели могут стать полезными инструментами в проектировании транспортных систем. ИИ-агент может получать доступ к информации из тысяч научных статей на платформах типа arXiv, а также из технических руководств и нормативных стандартов и интегрировать ее для формирования проектов.

Уже сейчас у инженеров есть возможность отдавать команды на естественном языке, например: «Разработайте компонент железнодорожного вагона, который может надежно работать при температурах от  $-50$  до  $+50$  °C». Языковая модель обрабатывает промпт, проанализирует соответствующие данные по материаловедению и сгенерирует 3D-CAD-модель в стандартном формате, таком как DXF, готовую для конечно-элементного анализа либо потенциально для трехмерной печати или станка с ЧПУ на производстве.

Здесь интеллектуальные агенты выступают не в качестве заменителей людей, а в качестве помощников. Они способны быстро найти всю необходи-

мую информацию по нужному вопросу на тысячах страниц технической документации, стандартов, правил и предоставить ее инженеру-конструктору.

В области систем автоматизированного проектирования (САПР) исследовательские отделы нескольких глобальных поставщиков ИТ-инструментов разработали подходы к их интеграции с ИИ. БЯМ могут быть дополнительно обучены на инженерных чертежах, после чего они могут генерировать и редактировать эскизы на основе текстовых описаний. Это значительно ускоряет рабочий процесс, позволяя инженерам быстро создавать и изменять сложные геометрические двухмерные и трехмерные электронные представления.

Помимо этого, нейронные сети способны генерировать модели САПР из облака точек (данных 3D-сканирования). При этом интегрированный агент ИИ позволяет редактировать геометрию полученной модели изделия на лету. Данный подход может радикально изменить процессы обратного проектирования.

ИИ может эффективно генерировать скрипты для систем САПР, поддерживающих программирование. Так, можно описать необходимый объект (например, «создать элемент крепления рельса КБ-65») и получить готовый скрипт, пригодный для дальнейшей обработки в стандартной САПР-системе [5, 6].

Основываясь на постоянно пополняемой базе знаний, ИИ может предлагать и новые идеи в проектировании, использующие самые передовые достижения в материаловедении или аэродинамике, что значительно ускоряет инновационный цикл [7].

### ***Интеллектуальная робототехника***

Роботы и роботизированные системы играют все более важную роль в транспортных системах. Можно упомянуть автономные системы инспекции и контроля, например рельсов и контактной сети, автоматическую диагностику с достаточно сложными алгоритмами обработки данных и многое другое. Эти системы выполняют все более сложные задачи в области мониторинга инфра-

структуры, состояния активов и технического обслуживания оборудования [8].

Важно отметить, что транспортные роботы могут выполнять опасные операции, не подвергая риску человеческую жизнь и здоровье. Нередко оборудование работает в экстремальных условиях: при температурах от  $-50$  до  $+50$  °С, под воздействием вибрации и пр. [9].

Роботы могут работать автономно в течение недель или месяцев, снижая стоимость операций, поскольку нет необходимости в системах защиты персонала и жизнеобеспечения.

Подчеркнем, что роботы могут обладать различными уровнями «интеллекта». Первый уровень — это просто жестко запрограммированный или дистанционно управляемый манипулятор. Промышленные роботы выполняют строго заданную последовательность операций с предварительно откалиброванными движениями и перемещениями. Есть роботы «второго уровня», или адаптивные роботизированные системы. Эти системы оснащены датчиками и/или машинным зрением, предотвращая, например, нерациональное «захватывание воздуха», когда заготовка не доставлена в нужную область.

Однако нас интересуют роботы «третьего уровня», способные к высокой степени автономности и самостоятельному планированию операций на базе лишь примерного плана задач и поставленных целей. Это мобильные роботы, оснащенные датчиками (сенсорами, камерами, лидарами) для восприятия окружающей среды и вычислительными мощностями (микропроцессорами, нейронными сетями) для обработки данных. Они используют алгоритмы и методы искусственного интеллекта (машинное обучение, компьютерное зрение, планирование действий) для автономного принятия решений [10].

Интеллект транспортных роботов основан на сочетании технологий. Машинное, или компьютерное, зрение имеет решающее значение для распознавания образов, осмотра поверхностей и обнаружения дефектов. Искусственный интеллект позволяет мобильным роботам перемещаться, избегать столкновений и достигать пункта

назначения без постоянной связи с оператором или диспетчером.

Например, в публикациях отмечалось, что автоматизированная система мониторинга железнодорожной инфраструктуры потенциально может быть основана на использовании искусственного интеллекта и современных технологий обработки изображений. Такая система может использоваться для раннего обнаружения потенциальных угроз, таких как несанкционированный доступ к объектам и чрезвычайные ситуации, в том числе на переездах [11, 12].

В автономных транспортных средствах мультимодальные БЯМ могут быть использованы для повышения качества и точности детекции или обнаружения объектов путем интеграции визуальных данных с текстовым контекстом, что приводит к более надежному и устойчивому распознаванию пешеходов, транспортных средств и дорожных аварий. Это улучшает существующие алгоритмы локализации и картографирования, позволяя автономному транспортному средству формировать более полное и точное понимание окружающей среды и более надежно ориентироваться [12].

При решении логистических задач ИИ может управлять «роем» роботов на складе или в порту. Высокоуровневая команда, например «разгрузить контейнеровоз», будет разбита агентами ИИ с разными целями и промптами на ряд скоординированных задач, распределенных между отдельными роботами, оптимизируя общий рабочий процесс для повышения эффективности, предотвращения столкновений и адаптации к непредвиденным событиям.

### ***Интеллектуальное управление дорожным движением***

Несколько недавно опубликованных исследований продемонстрировали эффективность БЯМ в управлении сложными системами городской мобильности. Например, реализовано успешное управление светофорами с помощью ИИ путем применения следующей методологии. БЯМ используются в качестве агентов принятия решений, когда модель, интерпретируя данные о дорожном движении в реальном времени на базе специаль-

ного подробного запроса, может анализировать транспортный поток и принимать интеллектуальные решения для корректировки времени работы светофоров, борясь с пробками более эффективно, чем традиционные методы и даже подходы с обучением с подкреплением [12].

Проект ChatSUMO интегрирует БЯМ с имитационной моделью дорожного движения SUMO (Simulation of Urban MObility). Это позволяет использовать сложные реалистичные сценарии дорожного движения с использованием команд на естественном языке, автоматизируя процесс и обеспечивая более надежные системы автономного вождения и стратегии управления дорожным движением [13].

БЯМ могут применяться и для оптимизации работы общественного транспорта. В тематическом исследовании в Сан-Антонио изучалось, как ИИ-агенты могут улучшить функционирование общественного транспорта путем обработки данных General Transit Feed Specification [14]. Модель помогает улучшить распределение ресурсов, оптимизировать расписания и повысить удовлетворенность пассажиров, предоставляя информацию о транспортной сети в реальном времени.

### ***Предиктивное техобслуживание и ремонт***

Общеизвестно, что одной из важнейших проблем в работе сложных технических и технологических систем является обеспечение необходимого уровня надежности и отказоустойчивости. Искусственный интеллект может помочь в решении этой проблемы, используя такие подходы, как предиктивное техническое обслуживание и интеллектуальный анализ больших данных.

ИИ может прогнозировать чрезвычайные ситуации до их возникновения. На данный момент появилась возможность собирать беспрецедентное количество данных, отражающих различные аспекты функционирования агрегатов и устройств, с помощью датчиков интернета вещей (internet of things, IoT). Интеллектуальный агент способен провести анализ состояния конкретного устройства, выявляя признаки износа и скрытые риски. Компьютер может реализовать интеллектуальную

систему мониторинга, обрабатывающую тысячи параметров в режиме реального времени, и формировать картину всей сложной системы, предоставляя возможности, которых у нас раньше не было. При этом ИИ может проводить корреляционный анализ между различными типами сигналов, выявляя сложные и иногда неожиданные зависимости [7].

Весьма важной тенденцией в настоящее время является использование цифровых двойников. Имитационные модели железнодорожного оборудования широко используются как на этапе разработки, так и на этапе эксплуатации. Данные модели воспроизводят поведение реальных систем в виртуальной среде, позволяя тестировать различные сценарии без риска повреждения реального оборудования.

Интеграция ИИ с цифровыми двойниками открывает путь к созданию самообучающихся моделей, адаптирующихся к изменениям в поведении реальных систем. Например, если во время эксплуатации меняются внешние условия (неожиданное изменение температуры может повлиять на электронику), ИИ может корректировать модель, лежащую в основе цифрового двойника, на основе поступающих данных, корректируя свои прогнозы и рекомендации по техническому обслуживанию. В реальных проектах такие системы уже продемонстрировали сокращение времени простоя на 30–50% благодаря прогнозному анализу [15].

Например, российские исследователи разработали методы анализа влияния осевых нагрузок подвижного состава на усталостную долговечность рельсов с использованием многоосевой модели усталости Брауна — Миллера, которую они интегрировали в программную систему *Fatigue*. В области надежности тягового оборудования для городского электротранспорта для определения интегрального показателя используется метод аналитической иерархической обработки [15].

Непрерывно анализируя эксплуатационные данные с датчиков, логи и условия окружающей среды, ИИ может выявлять тонкие закономерности, предшествующие механическим отказам. Как показано в недавних исследованиях, ИИ может прогнози-

ровать усталость материала в критически важных компонентах, что позволяет заблаговременно планировать техническое обслуживание [15].

### Проблемы и вызовы

Естественно, с языковыми моделями связаны не только возможности, но и проблемы и риски, особенно в критически важных для безопасности приложениях, часто встречающихся на транспорте. Языковые модели имеют статистическую природу, поэтому в некоторых случаях их поведение может быть непредсказуемым.

Другой проблемный момент заключается в том, что нейросеть — это черный ящик, что присуще и языковым моделям.

Поэтому необходимо разрабатывать специальные меры верификации и валидации, учитывающие внутреннюю структуру языковых моделей и их алгоритмов. Эти меры должны быть достаточными для целей сертификации, обычно применяемых в транспортной отрасли.

При развертывании разработанных агентов ИИ следует использовать такие технологии, как *Docker* и *Kubernetes*, и обрабатывать конфиденциальную информацию локально, в закрытой сети. При этом многие достаточно эффективные языковые модели являются открытыми и могут быть загружены и установлены на локальных серверах в защищенной сети предприятия.

### Заключение

Современные языковые модели обладают огромным потенциалом в транспортной отрасли. Они могут быть использованы в качестве основы для создания интеллектуальных агентов, в некоторых случаях даже команд сотрудничающих интеллектуальных агентов со специфическими целями и промптами.

Одни ИИ-агенты могут использоваться для интеллектуального автономного управления и навигации, другие — для технического обслуживания и обеспечения надежности. В статье рассматриваются различные приложения, начиная от генеративного CAD-моделирования и роевой робототехники до интеллектуального управления дорожным движением.

Использование потенциала рассуждающих агентов может повысить эффективность, уменьшить влияние человеческого фактора и ускорить инновации [11, 12, 14].

С другой стороны, необходимо уделять достаточно внимания проблемам и рискам, связанным с искусственным интеллектом. Эти проблемы особенно важны для критически важных систем, используемых в транспортной отрасли.

Ключевую роль здесь потенциально сыграют методы, специально разработанные для улучшения интерпретируемости моделей, а также разработка и внедрение новых нормативных актов, регулирующих разработки и использование систем ИИ.

Успешная интеграция больших языковых моделей требует совместных усилий исследователей, инженеров и управленцев для обеспечения безопасного и надежного развертывания технологий ИИ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Часовских В. П., Кох Е. В. Технологии цифровой трансформации на транспорте // *Фундаментальные исследования*. 2023. № 8. С. 57–61. DOI: 10.17513/fr.43495.
2. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками / В. М. Лохин [и др.] // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. Т. 16, № 8. С. 545–555. DOI: 10.17587/mau.16.545-555.
3. Carlson K. W. Highlights of the Issue: Governance, Agents, Evolutionary Search // *SuperIntelligence — Robotics — Safety and Alignment*. 2025. Vol. 2, no. 3. 6 p. DOI: 10.70777/si.v2i3.15417.
4. Nie T., Sun J., Ma W. Exploring the Roles of Large Language Models in Reshaping Transportation Systems: A Survey, Framework, and Roadmap // *Artificial Intelligence for Transportation*. 2025. Vol. 1. Art. no. 100003. 31 p. DOI: 10.1016/j.ait.2025.100003.
5. Generative AI in Transportation Planning: A Survey / L. Da [et al.] // *ArXiv*. 2025. Vol. 2503.07158. 56 p. DOI: 10.48550/arXiv.2503.07158.
6. A Gentle Introduction and Tutorial on Deep Generative Models in Transportation Research / S. Choi [et al.] // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 2025. Vol. 176. Art. no. 105145. 66 p. DOI: 10.1016/j.trc.2025.105145.
7. Benchmarking the Capabilities of Large Language Models in Transportation System Engineering: Accuracy, Consistency, and Reasoning Behaviors / U. Syed [et al.] // *ArXiv*. 2024. Vol. 2408.08302. 23 p. DOI: 10.48550/arXiv.2408.08302.
8. Романов А. М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 1. Промышленная робототехника // *Russian Technological Journal*. 2019. Т. 7, № 5. С. 30–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46.
9. Солятов А. А., Сидоренко В. С. Система мехатронных модулей управления адаптивного торможения // *Динамика и виброакустика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 40–49. DOI: 10.18287/2409-4579-2021-7-4-40-49.
10. Федоров В. А., Огородникова О. М. Повышение качества обучения сверточных нейронных сетей в задачах технического зрения беспилотных поездов // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025. Т. 13, № 4. 11 с. DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.002.
11. Сацюк А. В. Мониторинг инфраструктуры на основе искусственного интеллекта // *Автоматика, связь, информатика*. 2025. № 9. С. 32–34. DOI: 10.62994/AT.2025.9.9.005.
12. Multimodal LLM for Intelligent Transportation Systems / D. Le [et al.] // *ArXiv*. 2024. Vol. 2412.11683. 5 p. DOI: 10.48550/arXiv.2412.11683.
13. Li S., Azfar T., Ke R. ChatSUMO: Large Language Model for Automating Traffic Scenario Generation in Simulation of Urban Mobility // *ArXiv*. 2024. Vol. 2409.09040. 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.2409.09040.
14. Exploring the Potential of Large Language Models in Public Transportation: San Antonio Case Study / R. Jonnala [et al.] // *ArXiv*. 2025. Vol. 2501.03904. 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.2501.03904.

15. Хижняк М. А. Развитие информационной платформы АСУ станции посредством взаимодействия с системами идентификации подвижного состава, комплексами управления сортировочной автоматикой и устройствами спутниковой навигации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2018. Т. 77, № 2. С. 118–124. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-2-118-124.

Дата поступления: 22.01.2026

Решение о публикации: 06.02.2026

## Prospects for Using Large Language Models of Artificial Intelligence in Transport

**Andrey A. Tyugashev**

— Dr. Sci. in Engineering, Docent. Professor of the Computer Science and Computer Engineering Department. Research interests: artificial intelligence, software engineering. E-mail: tau797@mail.ru

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

**For citation:** Tyugashev A. A. Prospects for Using Large Language Models of Artificial Intelligence in Transport, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 33–40. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-33-40. (In Russian)

**Abstract.** *This paper explores the potential of using large language models (LLMs), such as GPT-5.2 and Gemini 3, in the transportation industry through applications in vehicle design, autonomous navigation, traffic control, and other areas. Special attention is given to augmented sampling generation and multimodal processing. Key issues discussed include safety certification, model transparency, and ethical considerations of their implementation. **Purpose:** to investigate the prospects for using AI agents based on LLMs in the transport industry. **Results:** this paper considers the use of augmented sampling generation and multimodal data processing, along with examples, including traffic light control using AI, simulation scenario generation and driver fatigue analysis. **Theoretical Significance:** this paper concludes that the synergy between AI and transportation will inevitably lead to increased safety and efficiency, and that LLMs will play a significant role in future intelligent adaptive transport systems.*

**Keywords:** *large language models, transportation, AI agents, predictive maintenance, generative design, safety-critical systems*

### REFERENCES

1. Chasovskikh V. P., Koch E. V. Tekhnologii tsifrovoy transformatsii na transporte [Technologies of Digital Transformation in Transport], *Fundamentalnye issledovaniya [Fundamental Research]*, 2023, no. 8, pp. 57–61. DOI: 10.17513/fr.43495. (In Russian)
2. Lokhin V. M., et al. Mekhanizmy intellektualnykh obratnykh svyazey, obrabotki znaniy i samoobucheniya v sistemakh upravleniya avtonomnymi robotami i multiagentnymi robototekhnicheskimi gruppировkami [Intelligent Feedback, Knowledge Processing and Self Learning in the Control Systems of the Autonomous Robots and Multi-Agent Robotic Groups], *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 545–555. DOI: 10.17587/mau.16.545-555. (In Russian)

3. Carlson K. W. Highlights of the Issue: Governance, Agents, Evolutionary Search, *SuperIntelligence — Robotics — Safety and Alignment*, 2025, vol. 2, no. 3, 6 p. DOI: 10.70777/si.v2i3.15417.
4. Nie T., Sun J., Ma W. Exploring the Roles of Large Language Models in Reshaping Transportation Systems: A Survey, Framework, and Roadmap, *Artificial Intelligence for Transportation*, 2025, vol. 1, art. no. 100003, 31 p. DOI: 10.1016/j.ait.2025.100003.
5. Da L., et al. Generative AI in Transportation Planning: A Survey, *ArXiv*, 2025, vol. 2503.07158, 56 p. DOI: 10.48550/arXiv.2503.07158.
6. Choi S., et al. A Gentle Introduction and Tutorial on Deep Generative Models in Transportation Research, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2025, vol. 176, art. no. 105145, 66 p. DOI: 10.1016/j.trc.2025.105145.
7. Syed U., et al. Benchmarking the Capabilities of Large Language Models in Transportation System Engineering: Accuracy, Consistency, and Reasoning Behaviors, *ArXiv*, 2024, vol. 2408.08302, 23 p. DOI: 10.48550/arXiv.2408.08302.
8. Romanov A. M. Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo massh-taba i naznacheniya. Chast 1. Promyshlennaya robototekhnika [A Review on Control Systems Hardware and Software for Robots of Various Scale and Purpose. Part 1. Industrial Robotics], *Russian Technological Journal*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 30–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46. (In Russian)
9. Solyatov A. A., Sidorenko V. S. Sistema mekhatronnykh moduley upravleniya adaptivnogo tormozheniya [System of Mechatronic Control Modules for Adaptive Braking], *Dinamika i vibroakustika [Journal of Dynamics and Vibroacoustics]*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 40–49. DOI: 10.18287/2409-4579-2021-7-4-40-49. (In Russian)
10. Fedorov V. A., Ogorodnikova O. M. Povyshenie kachestva obucheniya svertochnykh neyronnykh setey v zadachakh tekhnicheskogo zreniya bespilotnykh poezdov [Improving the Quality of Convolutional Neural Networks Learning in the Tasks of Machine Vision of Unmanned Trains], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii [Modeling, Optimization and Information Technology]*, 2025, vol. 13, no. 4, 11 p. DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.002. (In Russian)
11. Satsiuk A. V. Monitoring infrastruktury na osnove iskusstvennogo intellekta [Automated Monitoring System for Railway Infrastructure Based on Artificial Intelligence], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2025, no. 9, pp. 32–34. DOI: 10.62994/AT.2025.9.9.005. (In Russian)
12. Le D., et al. Multimodal LLM for Intelligent Transportation Systems, *ArXiv*, 2024, vol. 2412.11683, 5 p. DOI: 10.48550/arXiv.2412.11683.
13. Li S., Azfar T., Ke R. ChatSUMO: Large Language Model for Automating Traffic Scenario Generation in Simulation of Urban Mobility, *ArXiv*, 2024, vol. 2409.09040, 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.2409.09040.
14. Jonnala R., et al. Exploring the Potential of Large Language Models in Public Transportation: San Antonio Case Study, *ArXiv*, 2025, vol. 2501.03904, 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.2501.03904.
15. Khizhnyak M. A. Razvitie informatsionnoy platformy ASU stantsii posredstvom vzaimodeystviya s sistemami identifikatsii podvizhnogo sostava, kompleksami upravleniya sortirovochnoy avtomatikoy i ustroystvami sputnikovoy navigatsii [Development of the Information Platform of the Station ACS Through Interaction with the Rolling Stock Identification Systems, Control Complexes for Sorting Automation and satellite Navigation Devices], *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Russian Railway Science Journal]*, 2018, vol. 77, no. 2, pp. 118–124. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-2-118-124. (In Russian)

Received: 22.01.2026

Accepted: 06.02.2026

УДК 004.942

## Сравнительный анализ современных методов сжатия без потерь данных облачных провайдеров

**Юдников Степан Сергеевич<sup>1</sup>**

— магистрант 2-го курса направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии». Научные интересы: информационные системы, искусственный интеллект, методы и алгоритмы сжатия данных. E-mail: s.yudnikovv@gmail.com

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич<sup>1,2</sup>**

— д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы»; профессор кафедры математического и программного обеспечения. Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru

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

<sup>2</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

**Для цитирования:** Юдников С. С., Хомоненко А. Д. Сравнительный анализ современных методов сжатия без потерь данных облачных провайдеров // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 41–50. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-41-50

**Аннотация.** Экспоненциальный рост объемов данных в облачных средах делает критически важной задачу их эффективного сжатия для оптимизации использования ресурсов хранения, пропускной способности сети и вычислительных мощностей, что напрямую влияет на экономическую и операционную эффективность. **Цель:** провести сравнительный анализ современных алгоритмов сжатия без потерь для определения оптимальных сценариев их применения в облачных платформах. **Результаты:** систематизированы принципы работы и классификация современных алгоритмов сжатия без потерь. На основе сравнительного анализа по ключевым параметрам (коэффициент сжатия, скорость операций, ресурсоемкость) определены сценарии оптимального применения алгоритмов Gzip, LZ4, Zstandard и Brotli в облачных сервисах. **Практическая значимость:** полученные результаты можно использовать для оптимизации затрат на облачную инфраструктуру и повышения производительности распределенных систем обработки данных. **Обсуждение:** проведенный анализ демонстрирует, что выбор алгоритма зависит от специфики задачи. Использование аппаратного ускорения позволяет значительно повысить производительность компрессии.

**Ключевые слова:** компрессия данных, сжатие без потерь, облачные вычисления, алгоритмы сжатия, Gzip, LZ4, Zstandard, Brotli, производительность облачных систем, оптимизация затрат, сетевой трафик, аппаратное ускорение

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

### Введение

Экспоненциальный рост объемов данных в облачных средах, обусловленный цифровой трансформацией, распространением IoT-устройств

и развитием аналитических систем, создает серьезные вызовы для эффективного управления информационными ресурсами [1].

Ключевой проблемой современной облачной экосистемы является оптимизация использования трех критически важных ресурсов: емкости хранения, пропускной способности сетей и вычислительной мощности. Традиционные подходы к масштабированию инфраструктуры демонстрируют ограниченную эффективность в условиях нелинейного роста данных, что актуализирует необходимость внедрения интеллектуальных методов оптимизации.

Сжатие данных без потерь представляет собой один из наиболее эффективных инструментов решения указанных проблем. В отличие от компрессии с потерями, применяемой преимущественно для мультимедийного контента, алгоритмы без потерь обеспечивают полное сохранение семантической целостности данных, что особенно критично для бизнес-приложений, транзакционных систем и нормативной отчетности.

Современные облачные платформы предоставляют широкий спектр алгоритмов сжатия — от классического Gzip до высокопроизводительных Zstandard и Brotli, демонстрирующих радикально разные характеристики скорости, степени сжатия и вычислительной сложности [2]. При этом отсутствие системного подхода к выбору алгоритма под конкретную задачу часто ведет к неэффективному использованию ресурсов и росту операционных расходов.

В условиях экспоненциального роста данных в облаках поиск оптимальных методов сжатия без потерь становится ключевым фактором экономии и повышения производительности. В статье представлен сравнительный анализ алгоритмов сжатия с учетом аппаратной акселерации, а также предложены адаптивные критерии их выбора для типичных сценариев использования в облачных средах. Основным результатом — практические рекомендации и модель выбора, учитывающая тип рабочей нагрузки и целевые показатели производительности, что и составляет научную новизну работы.

Практическая значимость исследования определяется возможностью непосредственного применения полученных результатов для оптимизации затрат на облачную инфраструктуру и повышения

производительности распределенных систем обработки данных.

## Характеристика и классификация современных алгоритмов сжатия

Ключевая задача алгоритмов сжатия — снизить избыточность представления данных, минимизируя объем хранимой или передаваемой информации. Их важность особенно возрастает в контексте облачных платформ, где сжатие напрямую влияет на ключевые показатели эффективности: стоимость хранения, пропускную способность сети и скорость обработки транзакций [3].

Существует две парадигмы сжатия данных:

- сжатие с потерями (lossy compression) используется преимущественно для мультимедийных данных (изображения, звук, видео), когда допустимо удаление незначимой информации;
- сжатие без потерь (lossless compression) сохраняет точную копию исходных данных после восстановления. Именно такие алгоритмы применяются при работе с программным кодом, документами, логами, базами данных, конфигурационными файлами и архивами в информационных системах.

В статье основное внимание уделяется алгоритмам сжатия без потерь как наиболее востребованным в сфере облачных технологий, где важно сохранять целостность и точность передаваемых и обрабатываемых данных.

Методы сжатия без потерь можно условно разделить на статистические и словарные.

*Статистические методы сжатия* основаны на разной вероятности появления символов (или их последовательностей) в данных, присваивая более короткие коды наиболее частым элементам. К числу ключевых методов статистического сжатия относятся:

- кодирование Хаффмана (Huffman coding) — алгоритм, строящий оптимальное префиксное дерево для присвоения переменных кодов символам [4]. Благодаря эффективности и простоте он стал основой ряда распространенных форматов, таких как Gzip, PNG, используется в составе более сложных алгоритмов (например, DEFLATE);

- арифметическое кодирование — работает с вещественными интервалами вероятностей, позволяя достичь более высокой степени сжатия, чем алгоритм Хаффмана, но требует больше ресурсов [5];

- кодирование Шеннона — Фано (Shannon — Fano coding) — предшественник метода Хаффмана, менее эффективный, но демонстрирующий основные принципы статистической компрессии [6].

*Словарные методы сжатия* основываются на замене повторяющихся фрагментов данных указателями на словарь, содержащий ранее встречающиеся шаблоны. Подход показывает высокую эффективность на текстовых данных. Наиболее известные алгоритмы:

- LZ77 — использует скользящее окно для поиска повторяющихся строк в недавней истории потока данных [7];

- LZ78 — создает динамический словарь из уникальных подстрок и работает эффективнее в случаях, где повторяющиеся шаблоны разнесены по потоку [8];

- LZW — усовершенствованная версия LZ78, получившая широкое распространение, в частности, в формате GIF и протоколе TIFF [9];

- LZ4 и Zstandard (ZSTD) — высокоскоростные алгоритмы нового поколения, представляющие эволюцию семейства LZ. Ключевыми их преимуществами являются экстремальная скорость (LZ4) и настраиваемый компромисс между производительностью и степенью сжатия (ZSTD) [10].

### **Принципы работы основных алгоритмов сжатия данных**

В современных вычислительных системах, в том числе в облачных средах, применяется ряд алгоритмов уменьшения объема информации. Каждый из них имеет свои сильные стороны, ограничения и оптимальные сферы использования.

#### *Алгоритм Gzip и гибридная модель DEFLATE*

Данный метод остается одним из наиболее распространенных решений для уменьшения размера данных [11]. В его основе лежит гибридная модель DEFLATE, которая комбинирует два подхода [12]:

- словарное сжатие (LZ77) обнаруживает и заменяет повторяющиеся фрагменты данных ссылками в специальном словаре;

- энтропийное кодирование (Хаффмана) присваивает более короткие коды часто встречающимся элементам, а более длинные — редким.

Главные достоинства Gzip — повсеместная поддержка в программном обеспечении и операционных системах, а также баланс между степенью сжатия и скоростью работы. Этот алгоритм часто используют для уменьшения веб-трафика, ускорения загрузки сайтов, архивирования файлов и хранения журналов событий [13].

#### *Алгоритм LZ4*

Данный метод разработан для достижения предельной скорости как упаковки, так и восстановления данных. Эта особенность сделала его популярным в системах, чувствительных к задержкам, — при обработке потоков информации и в приложениях реального времени. В основе LZ4 также лежит принцип LZ77, но реализованный с минимальными вычислениями и упрощенной логикой поиска повторов [14].

Ключевые свойства LZ4:

- исключительно быстрая распаковка (до 1200 МБ/с), что позволяет работать с большими массивами данных почти без задержек;

- умеренная степень сжатия (примерно в 1,5–1,8 раза), что меньше, чем у более сложных алгоритмов, но приемлемо для многих задач;

- низкое потребление вычислительных мощностей, что позволяет использовать его в системах с ограниченными ресурсами, например в IoT-устройствах.

LZ4 часто применяется в облачных платформах для сжатия временных файлов, логов и в системах потоковой передачи данных.

#### *Алгоритм Zstandard: баланс скорости и эффективности*

Это современный метод, созданный в 2015 году, который сочетает высокую скорость, характерную для LZ4, и хорошую степень сжатия, как у Gzip. Он предлагает до 22 уровней сжатия, позволяя

гибко выбирать между скоростью и итоговым размером данных [13].

Основные черты ZSTD:

- высокая степень сжатия (может достигать 5:1), что заметно превосходит Gzip;
- эффективная работа в многопоточном режиме и поддержка потоковой обработки, что хорошо подходит для современных серверов;
- широкая интеграция с популярными системами хранения и базами данных.

Эти качества делают ZSTD стандартом де-факто для сжатия в облачных системах.

### Алгоритм Brotli

Этот метод, разработанный компанией Google, ориентирован на максимально эффективное сжатие веб-контента [15]. Он использует сложные схемы кодирования, учитывающие контекст данных, а также обширный предустановленный словарь распространенных фрагментов HTML, CSS и JavaScript.

Особенности Brotli:

- наивысшая степень сжатия, особенно для больших веб-файлов;
- относительно невысокая скорость упаковки, что ограничивает его применение в сценариях, где важна скорость записи;
- достаточная скорость восстановления для клиентских устройств;
- идеален для оптимизации веб-трафика через сети доставки контента (CDN) для ускорения загрузки страниц.

Brotli поддерживается всеми современными браузерами и активно используется в CDN для

экономии трафика и повышения скорости отклика сайтов.

### Сравнение алгоритмов сжатия

Чтобы выбрать подходящий алгоритм для облачной платформы, необходимо учитывать несколько параметров: итоговый коэффициент уменьшения объема, быстродействие при сжатии и распаковке, а также нагрузку на систему. В табл. 1 приведены сводные характеристики четырех рассмотренных методов:

1. Степень сжатия. Показывает, насколько уменьшается исходный объем данных. Brotli и ZSTD в этом аспекте лидируют, что делает их предпочтительными для экономии места на диске или пропускной способности сети.

2. Скорость операций. Быстрота сжатия критична при работе с большими потоками данных. Здесь лидирует LZ4 благодаря простой реализации. ZSTD предлагает хороший баланс. Brotli — самый медленный.

3. Скорость распаковки. Особенно важна для сервисов, часто читающих данные. LZ4 и здесь является лидером.

4. Требования к ресурсам. Алгоритмы с высокой степенью сжатия (Brotli, ZSTD на высоких уровнях) обычно требуют больше памяти и процессорного времени. LZ4, напротив, очень нетребователен и может работать на маломощном оборудовании.

Выбор конкретного алгоритма должен основываться на специфике решаемой задачи, типе обрабатываемой информации и требованиях к производительности системы.

Таблица 1

### Сравнительные характеристики алгоритмов сжатия

Алгоритм	Степень сжатия	Скорость сжатия	Скорость распаковки	Требования к ресурсам
Gzip	Средняя (~2:1)	Средняя	Средняя	Средние
LZ4	Низкая (1,5–1,8:1)	Очень высокая	Очень высокая	Низкие
ZSTD	Высокая (3,5–5:1)	Высокая	Высокая	Средние
Brotli	Очень высокая	Низкая	Средняя	Высокие

## **Влияние сжатия на эффективность и затраты**

Применение сжатия в облачных платформах напрямую влияет на экономическую и операционную эффективность работы с большими данными. Можно выделить несколько ключевых аспектов этого влияния.

### *Экономия ресурсов хранения*

Основное преимущество — значительное сокращение физического объема данных. В облачных средах, где стоимость услуг хранения напрямую зависит от занимаемого места, это приводит к прямому снижению расходов.

В Microsoft Azure Synapse Analytics зафиксированы показатели коэффициента сжатия до 10:1 для специфичных наборов аналитических данных [6]. В Google BigQuery экономия на хранении данных при использовании встроенных алгоритмов сжатия достигает 75% по сравнению с необработанными данными [8].

Это достигается за счет нескольких факторов:

- использования эффективных алгоритмов сжатия, адаптированных под структуру данных;
- применения колоночных форматов, которые лучше сжимают однородные данные;
- автоматического определения платформой оптимального кодека.

Экономия в объемах хранения не только снижает прямые затраты на дисковое пространство, но и уменьшает нагрузку на системы резервного копирования и восстановления данных, что дополнительно оптимизирует затраты.

### *Оптимизация сетевого трафика*

Передача данных между облачными сервисами, пользователями и периферийными устройствами требует значительных сетевых ресурсов. Сжатие существенно сокращает объем передаваемых данных, что влияет на скорость обмена и стоимость каналов связи.

Так, применение gzip-компрессии позволяет снизить размер логов и телеметрии на 60–80%, что уменьшает задержки и сетевые расходы при мониторинге инфраструктуры.

Алгоритм Brotli, оптимизированный для веб-трафика, уменьшает объем HTML, CSS и JavaScript-файлов примерно на 20–25% [10], что положительно сказывается на скорости загрузки веб-страниц и снижении затрат на CDN.

Использование Zstandard в REST API и облачных сервисах позволяет сократить размер запросов и ответов до 50% [11], значительно повышая пропускную способность и снижая задержки.

Сокращение трафика особенно важно для облаков с гибридной архитектурой и edge-устройств, где каналы связи могут иметь ограниченную пропускную способность и высокую стоимость.

### *Ускорение аналитики и потоковой обработки*

Сжатие данных напрямую ускоряет их обработку в облачных системах. Меньший размер информации быстрее считывается и передается, что сокращает время вычислений.

Сервисы вроде AWS Redshift и Google BigQuery показывают ускорение выполнения запросов в 3–4 раза при работе со сжатыми данными по сравнению с несжатыми [16, 17]. Это происходит потому, что системе нужно прочитать и переместить меньше данных и они эффективнее помещаются в быструю память (кэш).

Алгоритм LZ4, имеющий очень высокую скорость восстановления данных (свыше 1 Гб/с), отлично подходит для обработки потоков в реальном времени, например при анализе логов и мониторинге.

ZSTD дает хороший баланс между тем, насколько сильно он сжимает, и тем, как быстро данные потом можно использовать. Это делает его надежным решением для задач анализа больших данных.

Эффективное сжатие также помогает системам легче масштабироваться, так как уменьшение объема хранимой и передаваемой информации снижает нагрузку на сеть и серверы.

### *Использование аппаратных ускорителей сжатия*

Для повышения производительности и энергоэффективности облачные платформы активно внедряют специализированные аппаратные блоки, которые разгружают CPU от ресурсоемких операций сжатия:

- Intel QuickAssist (QAT) — выделенный сопроцессор для аппаратного ускорения алгоритмов Gzip и ZSTD, способный в несколько раз увеличить скорость операций и снизить энергопотребление [13];
- процессоры Amazon Graviton на базе архитектуры ARM содержат встроенные аппаратные оптимизации для эффективной работы с алгоритмами LZ4 и ZSTD непосредственно в облачной среде;
- более сложные решения на базе программируемых микросхем (FPGA) и специализированных чипов (ASIC) используются для сжатия в реальном времени, особенно в системах передачи данных и распределенных хранилищах.

Использование такого оборудования позволяет свести задержки к минимуму и увеличить пропускную способность, что крайне важно для приложений, работающих в реальном времени, и аналитических систем.

### **Примеры и данные из практики**

Исследования и реальные случаи использования показывают значительный эффект от сжатия в облачных средах.

В Microsoft Azure Synapse автоматическое сжатие данных в хранилищах колоночного типа может уменьшать занимаемый объем до 10 раз. Это напрямую снижает ежемесячные расходы на хранение.

Согласно данным Google Cloud, встроенное сжатие в BigQuery позволяет экономить до 75% места. При этом аналитические запросы ускоряются почти в 4 раза за счет меньшей нагрузки на систему чтения/записи.

Эксперименты с Intel QAT показывают, что аппаратное ускорение может повысить производительность сжатия и распаковки в 5 раз по сравнению с программными методами, снижая энергопотребление на 30%.

В задачах потоковой обработки, таких как сбор телеметрии, использование LZ4 обеспечивает скорость восстановления данных до 1200 МБ/с, что критично для работы в реальном времени без задержек.

### **Практические советы по выбору алгоритма**

На основе анализа можно дать следующие рекомендации по выбору:

1. Для долгосрочного хранения больших объемов данных лучше подходят алгоритмы с высокой степенью сжатия, такие как ZSTD и Brotli. Они сильно экономят место при сохранении приемлемой скорости доступа.

2. Для передачи данных и веб-контента оптимальны Brotli и Gzip, так как они хорошо сжимают и поддерживаются повсеместно.

3. Для систем реального времени и потоковой обработки критически важна скорость распаковки. Здесь лидер — LZ4, который минимизирует задержки.

4. Для максимальной производительности и разгрузки процессора стоит рассмотреть использование аппаратного ускорения, например Intel QAT.

### **Заключение**

Сжатие данных — ключевой инструмент для оптимизации облачных платформ, влияющий и на стоимость, и на эффективность работы. В условиях постоянного роста объемов информации из-за развития интернета вещей, аналитики, машинного обучения и других технологий эффективное сжатие становится необходимо для масштабируемости и устойчивости облачных систем.

Польза сжатия подтверждена расчетами и практикой. Оно может сокращать расходы на хранение в 3–10 раз, ускорять выполнение аналитических запросов в 3–4 раза и значительно снижать сетевой трафик в распределенных системах.

Таким образом, сжатие данных — обязательный элемент при построении облачных систем. Особенно перспективными выглядят следующие направления:

- адаптивное сжатие, которое может автоматически подбирать лучший алгоритм в зависимости от типа обрабатываемых данных;
- аппаратное ускорение сжатия на базе QAT, FPGA, ARM Graviton и интеллектуальных сетевых интерфейсов;
- развитие edge-компрессии с низкой задержкой для распределенных вычислений и IoT;

- глубокая интеграция компрессии с форматами хранения и виртуализации (например, компрессия в файловых системах уровня Ceph, ZFS, Btrfs). Эффективность облачных решений в XXI веке все более будет зависеть от качества и гибкости применяемых алгоритмов сжатия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Верзилин Д. Н., Максимова Т. Г., Шаныгин С. И. Облачные технологии в развитии институтов цифровой трансформации российской экономики: статистическое исследование // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2025. Т. 41, вып. 1. С. 146–178. DOI: 10.21638/spbu05.2025.107.
2. Давыденко Е. А., Сабиргалиева А. М. Архивирование и сжатие файлов в Linux: методы, алгоритмы и их эффективность // Научный вестник гуманитарно-социального института. 2025. № 20. 5 с.
3. Чуркин Я. М. Сжатие алгоритмом Хаффмана // Инструменты и механизмы устойчивого инновационного развития: сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции (Самара, Россия, 6 февраля 2022 г.). Стерлитамак: Агентство международных исследований, 2022. С. 20–22.
4. Левин И. И., Дудников Е. А. Структурная модификация метода Хаффмана для сжатия плотных потоков данных без потерь на РВС // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2024. № 5 (241). С. 48–58. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-5-48-58.
5. Howard P. G., Vitter J. S. Arithmetic Coding for Data Compression // Proceedings of the IEEE. 1994. Vol. 82, iss. 6. Pp. 857–865. DOI: 10.1109/5.286189.
6. Добычин Р. С., Петров А. Р. Сравнительный анализ работы алгоритмов Шеннона — Фано и Хаффмана // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики: материалы 7-й научно-практической интернет-конференции (Тольятти, Россия, 30–31 марта 2016 г.). Ульяновск: Зебра, 2016. С. 12–14.
7. Kreft S., Navarro G. LZ77-Like Compression with Fast Random Access // Proceedings of the 2010 Data Compression Conference (Snowbird, UT, USA, 24–26 March 2010). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. Pp. 239–248. DOI: 10.1109/DCC.2010.29.
8. LZ78 Compression in Low Main Memory Space / D. Arroyuello [et al.] // String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2017): Proceedings of the 24th International Symposium, (Palermo, Italy, 26–29 September 2017). Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10508 / G. Fici [et al.] (eds). Cham: Springer, 2017. Pp. 38–50. DOI: 10.1007/978-3-319-67428-5\_4.
9. Dheemanth H. N. LZW Data Compression // American Journal of Engineering Research. 2014. Vol. 3, iss. 2. Pp. 22–26.
10. Faykus M. H., Calhoun J., Smith M. Lossy and Lossless Compression for BioFilm Optical Coherence Tomography (OCT) // SC-W 2023: Proceedings of the Workshops of the International Conference on High Performance Computing, Network, Storage, and Analysis (Denver, CO, USA, 12–17 November 2023). New York: Association for Computing Machinery, 2023. Pp. 281–288. DOI: 10.1145/3624062.3625125.
11. PymzML v2.0: Introducing a Highly Compressed and Seekable GZip Format / M. Kösters [et al.] // Bioinformatics. 2018. Vol. 34, no. 14. Pp. 2513–2514. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty046.
12. Oswal S., Singh A., Kumari K. Deflate Compression Algorithm // International Journal of Engineering Research and General Science. 2016. Vol. 4, iss. 1. Pp. 430–436.
13. Design and Optimization of Zstandard Algorithm Based on Concurrent Streaming of Multiple Hash Tables / L. Zheng [et al.] // Proceedings of the Second International Conference on Laser, Optics and Optoelectronic Technology (LOPET 2022) (Qingdao, China, 20–22 May 2022). Proceedings of SPIE. Vol. 12343. Bellingham (WA): Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2022. Pp. 571–576. DOI: 10.1117/12.2649516.
14. Эффективное сжатие лог-файлов: анализ производительности LZ4, Zstandard и гибридного подхода / И. Г. Рзун [и др.] // Вестник Академии знаний. 2025. № 4 (69). С. 435–443.

15. Brotli: A General-Purpose Data Compressor / J. Alakuijala [et al.] // ACM Transactions on Information Systems. 2019. Vol. 37, iss. 1. Art. no. 4. 30 p. DOI: 10.1145/3231935.
16. Гаврикова С. В. Обзор баз данных временных рядов // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Vol. 11, no. 11. Pp. 83–102.
17. Google BigQuery // Bisong E. Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform: A Comprehensive Guide for Beginners. Berkeley (CA): Apress, 2019. Pp. 485–517. DOI: 10.1007/978-1-4842-4470-8\_38.

Дата поступления: 23.11.2025

Решение о публикации: 23.01.2026

## Comparative Analysis of Modern Lossless Data Compression Methods Used by Cloud Providers

**Stepan S. Yudnikov**<sup>1</sup> — 2nd year Master's Degree Student in 09.04.02 Information Systems and Technologies. Research interests: information systems, artificial intelligence, methods and algorithms of data compression. E-mail: s.yudnikovv@gmail.com

**Anatoly D. Khomonenko**<sup>1,2</sup> — Dr. Sci. in Engineering, Full Professor, Professor of the Information and Computing Systems Department; Professor of the Department of Mathematical and Software Engineering. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modeling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

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

<sup>2</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

**For citation:** Yudnikov S. S., Khomonenko A. D. Comparative Analysis of Modern Lossless Data Compression Methods Used by Cloud Providers. *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 41–50. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-41-50. (In Russian)

**Abstract.** *The exponential growth of data volumes in cloud environments makes it critically important to efficiently compress this data to optimize the use of storage resources, network bandwidth and computational power, which directly affects economic and operational efficiency. **Purpose:** to conduct a comparative analysis of modern lossless compression algorithms to identify optimal scenarios for their application in cloud platforms. **Results:** the principles of operation and classification of contemporary lossless compression algorithms have been systematized. Based on a comparative analysis of key parameters, such as compression ratio, operation speed, and resource intensity, optimal application scenarios for the Gzip, LZ4, Zstandard and Brotli algorithms in cloud services have been determined. **Practical significance:** the results obtained can be used for optimizing costs associated with cloud infrastructure and for improving the performance of distributed data processing systems. **Discussion:** the conducted analysis demonstrates that the choice of algorithm depends on the specific characteristics of the task. The use of hardware acceleration can significantly improve compression performance.*

**Keywords:** data compression, lossless compression, cloud computing, compression algorithms, Gzip, LZ4, Zstandard, Brotli, cloud system performance, cost optimization, network traffic, hardware acceleration

## REFERENCES

1. Verzilin D. N., Maximova T. G., Shanygin S. I. Oblachnye tekhnologii v razvitiy institutov tsifrovoy transformatsii rossiyskoy ekonomiki: statisticheskoe issledovanie [Cloud Technologies in the Development of Institutions for Digital Transformation of the Russian Economy: Statistical Research], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika [St. Petersburg University Journal of Economic Studies]*, 2025, vol. 41, iss. 1, pp. 146–178. DOI: 10.21638/spbu05.2025.107 (In Russian)
2. Davydenko E. A., Sabirgalieva A. M. Arkhivirovanie i szhatie faylov v Linux: metody, algoritmy i ikh effektivnost [Archiving and Compressing Files in Linux: Methods, Algorithms and Their Effectiveness], *Nauchnyy Vestnik Gumanitarno-Sotsialnogo Instituta*, 2025, no. 20, 5 p. (In Russian)
3. Churkin Ya. M. Szhatie algoritmom Khaffmana [Huffman Coding for Data Compression], *Instrumenty i mekhanizmy ustoychivogo innovatsionnogo razvitiya: sbornik statey po itogam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Tools and Mechanisms for Sustainable Innovative Development: A Collection of Articles Based on the Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]*, Samara, Russia, February 06, 2022. Sterlitamak, Agency of International Research, 2022, pp. 20–22. (In Russian)
4. Levin I. I., Dudnikov E. A. Strukturnaya modifikatsiya metoda Khaffmana dlya szhatiya plotnykh potokov danykh bez poter na RVS [Structural Modification of The Huffman Method for Compression of Dense Data Streams Without Loss on a RCS], *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya Southern Federal University. Engineering Sciences]*, 2024, no. 5 (241), pp. 48–58. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-5-48-58. (In Russian)
5. Howard P. G., Vitter J. S. Arithmetic Coding for Data Compression, *Proceedings of the IEEE*, 1994, Vol. 82, iss. 6, pp. 857–865. DOI: 10.1109/5.286189.
6. Dobychin R. S., Petrov A. R. Sravnitelnyy analiz raboty algoritmov Shennona — Fano i Khaffmana [Comparative Analysis of the Shannon — Fano Algorithm and the Huffman Algorithm for Data Coding], *Mezhdistsiplinarnye issledovaniya v oblasti matematicheskogo modelirovaniya i informatiki: materialy 7-y nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii [Interdisciplinary Research on Mathematical Modelling and Computer Science: Proceedings of the 7th Scientific and Practical Internet Conference]*, Togliatti, Russia, March 30–31, 2016. Ulyanovsk, Zebra Publishing House, 2016, pp. 12–14. (In Russian)
7. Kreft S., Navarro G. LZ77-Like Compression with Fast Random Access, *Proceedings of the 2010 Data Compression Conference, Snowbird, UT, USA, March 24–26, 2010*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010, pp. 239–248. DOI: 10.1109/DCC.2010.29.
8. Arroyuelo D., et al. LZ78 Compression in Low Main Memory Space. In: *Fici G., et al. (eds) String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2017): Proceedings of the 24th International Symposium, Palermo, Italy, September 26–29, 2017*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10508. Cham, Springer, 2017, pp. 38–50. DOI: 10.1007/978-3-319-67428-5\_4.
9. Dheemanth H. N. LZW Data Compression, *American Journal of Engineering Research*, 2014, vol. 3, iss. 2, pp. 22–26.
10. Faykus M. H., Calhoun J., Smith M. Lossy and Lossless Compression for BioFilm Optical Coherence Tomography (OCT), *SC-W 2023: Proceedings of the Workshops of the International Conference on High Performance Computing, Network, Storage, and Analysis, Denver, CO, USA, November 12–17, 2023*. New York, Association for Computing Machinery, 2023, pp. 281–288. DOI: 10.1145/3624062.3625125.
11. Kösters M., et al. PymzML v2.0: Introducing a Highly Compressed and Seekable GZip Format, *Bioinformatics*, 2018, vol. 34, no. 14, pp. 2513–2514. DOI: 10.1093/bioinformatics/bty046.

12. Oswal S., Singh A., Kumari K. Deflate Compression Algorithm, *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2016, vol. 4, iss. 1, pp. 430–436.
13. Zheng L., et al. Design and Optimization of Zstandard Algorithm Based on Concurrent Streaming of Multiple Hash Tables, *Proceedings of the Second International Conference on Laser, Optics and Optoelectronic Technology (LOPET 2022), Qingdao, China, May 20–22, 2022*. Proceedings of SPIE. Vol. 12343. Bellingham (WA), Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2022, pp. 571–576. DOI: 10.1117/12.2649516.
14. Rzun I. G., et al. Yakhimovich I. S. Effektivnoe szhatie log-faylov: analiz proizvoditelnosti LZ4, Zstandard i gibridnogo podkhoda [Efficient Log File Compression: Performance Analysis of LZ4, Zstandard, and a Hybrid Approach], *Vestnik Akademii znaniy [Bulletin of the Academy of Knowledge]*, 2025, no. 4 (69), pp. 435–443. (In Russian)
15. Alakuijala J., et al. Brotli: A General-Purpose Data Compressor, *ACM Transactions on Information Systems*, 2019, vol. 37, iss. 1, art. no. 4, 30 p. DOI: 10.1145/3231935.
16. Gavrikova S. V. Obzor baz dannykh vremennykh ryadov [Time Series Databases Overview], *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 11, pp. 83–102. (In Russian)
17. Bisong E. Google BigQuery. In: *Bisong E. Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform: A Comprehensive Guide for Beginners*. Berkeley (CA), Apress, 2019, pp. 485–517. DOI: 10.1007/978-1-4842-4470-8\_38.

Received: 23.11.2025

Accepted: 23.01.2026

УДК 004.42:378.147.227

## Интерактивное средство поддержки изучения теории и практики работы с двоичным кодом

- 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
- Зверькова Дарья Александровна** — студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: двоичное кодирование, интеллектуальные информационные системы. E-mail: dzverkova50@gmail.com
- Карпич Эмилия Эдуардовна** — студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: информационные системы, двоичное кодирование. E-mail: emiliya1104@gmail.com
- Гильванов Ринат Гаффанович** — канд. воен. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, виртуальная и дополненная реальность, иммерсивные технологии. E-mail: gilvanov1950@mail.ru

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

**Для цитирования:** Герасимов М., Зверькова Д. А., Карпич Э. Э., Гильванов Р. Г. Интерактивное средство поддержки изучения теории и практики работы с двоичным кодом // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 51–58. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-51-58

**Аннотация.** Современное информационное пространство тесно взаимосвязано с прогрессом цифровых технологий, базирующихся на двоичной системе счисления, что требует понимания принципов работы с бинарными кодами. Многие студенты сталкиваются со сложностями при усвоении этой темы из-за ее отвлеченности и большого объема теоретического материала. **Цель:** разработка интерактивного обучающего приложения, предназначенного для повышения эффективности изучения темы двоичного кодирования и закрепления практических навыков работы с бинарными представлениями чисел. **Методы:** использованы методы проектирования интерактивных обучающих систем, программная реализация выполнена на языке Python с использованием библиотеки PyQt5. Разработанная структура включает модуль теоретических материалов, калькулятор двоичных операций и практический тренажер с автоматической проверкой ответов. **Результаты:** создано полнофункциональное приложение, объединяющее теоретическую и практическую части изучения темы двоичного кода. В режиме калькулятора реализованы операции сложения, вычитания, умножения, деления и побитовых преобразований в прямом, обратном и дополнительном кодах. Практический модуль обеспечивает автоматическую генерацию заданий и формирует обратную связь, что способствует лучшему усвоению материала и развитию вычислительных навыков. **Практическая значимость:** разработанное приложение может использоваться в образовательных организациях при изучении дисциплин, связанных с цифровой логикой, вычислительной техникой и архитектурой ЭВМ. Программа повышает наглядность учебного процесса и обеспечивает интерактивную практику, способствующую закреплению теоретических знаний на практике.

**Ключевые слова:** двоичный код, разработка обучающего приложения, интерактивность, Python

**2.3.5** — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

## Введение

Современная информационная сфера неразрывно связана с развитием цифровых технологий, основой которых является двоичная система счисления. Изучение устройства компьютера и цифровой техники, информатики и программирования предполагает владение принципами работы с двоичным кодом. Однако для многих обучающихся эта тема остается трудной из-за абстрактности и высокого объема теоретического материала.

Актуальной задачей, таким образом, является разработка обучающих программ, которые объединяют объяснение принципов работы с двоичным кодом и практику с автоматической обратной связью, способствующей закреплению знаний.

Цель работы — создать программный калькулятор двоичного кода и практический модуль, объединяющий теорию и автоматическую проверку результатов. Под программным калькулятором понимается интерактивное приложение с пользовательским интерфейсом, позволяющее выполнять вычисления над целыми числами в нескольких формах представления (прямой, обратный и дополнительный коды), выбирать базовую арифметическую операцию (сложение, вычитание, умножение, деление) и наблюдать пошаговое выполнение с учетом знакового бита, правил переноса и переполнения [1, 2].

Проверка знаний реализуется в практическом режиме: обучающийся решает задачу и вводит ответ; приложение автоматически вычисляет правильный результат в выбранном коде представления, сравнивает его с ответом пользователя и предоставляет разбор — побитовые преобразования, указание мест ошибок и комментарии по переполнению (при наличии). Повторная генерация исходных данных обеспечивает тренировку и закрепление навыков.

В статье кратко изложены основы двоичной системы счисления и особенности выполнения базовых арифметических операций. Кроме того, представлен методический подход к построению проверочных заданий, включающий:

- поэтапность (выбор формата кода → выбор операции → самостоятельное решение → автоматическая проверка → разбор ошибок);

- визуализацию побитовых действий и роли знакового разряда;
- вариативность исходных данных для многократной тренировки;
- формирование обратной связи, ориентированной на коррекцию типичных ошибок и осмысленное применение правил.

Такой подход направлен на формирование устойчивых навыков работы с двоичным кодом и их перенос на задачи вычислительной техники.

## Теоретические основы функционирования арифметико-логического устройства

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) — один из ключевых компонентов центрального процессора, предназначенный для выполнения базовых арифметических и логических операций [3–5]. Оно работает с машинными словами — операндами, которые представляют числовую или символьную информацию. Длина машинного слова, как правило, соответствует разрядности архитектуры — чаще всего 32 или 64 бита.

Основной задачей АЛУ является обработка данных на уровне микропроцессорных операций [6]. Данные (операнды) [7], необходимые для выполнения вычислений, поступают в устройство из регистров или оперативной памяти, после чего АЛУ производит соответствующие операции и передает результат в нужный блок системы [8, 9]. Управление процессом осуществляет блок управления, формирующий управляющие сигналы на основе декодированных машинных команд.

Функциональность АЛУ охватывает широкий спектр задач, условно делящихся на следующие группы [4, 10]:

- арифметические операции включают сложение, вычитание, вычитание модулей (короткие операции), умножение, деление, а также операции с числами с плавающей точкой, десятичную арифметику и индексные вычисления;
- логические операции охватывают побитовые преобразования (И, ИЛИ, НЕ, XOR), сравнение значений, а также манипуляции с логическими структурами данных [2];

- специальные арифметические операции, такие как нормализация, арифметический сдвиг (сдвигаются только цифровые разряды, знаковый разряд остается на месте), логический сдвиг [1].

Корректность выполнения арифметических операций в цифровой системе во многом зависит от формата представления чисел. Для представления разных форматов чисел применяют разные коды:

- прямой код — наиболее простой способ представления чисел, где старший бит отвечает за знак, а остальные — за модуль числа. Его недостаток — наличие двух нулей (+0 и -0);

- обратный код сохраняет структуру прямого кода для положительных чисел, а отрицательные представляются через побитовую инверсию. Проблема двух нулей остается;

- в дополнительном коде для представления отрицательного числа используется инверсия всех битов положительного значения с последующим прибавлением единицы. Данный формат широко применяется в современных архитектурах благодаря удобству реализации арифметических операций [1, 2].

Разнообразие задач, стоящих перед АЛУ, предопределяет наличие различных их классификаций [3, 10].

1. По характеру обрабатываемых данных и их функциональному назначению:

- операции двоичной арифметики для чисел с фиксированной точкой применяются при выполнении базовых вычислений в целочисленном представлении;

- операции двоичной (или шестнадцатеричной) арифметики для чисел с плавающей точкой характерны для научных и инженерных задач, требующих расширенного диапазона представления;

- операции десятичной арифметики используются в финансовых приложениях и других областях, где важно точное представление десятичных дробей;

- операции индексной арифметики выполняются при работе с адресами памяти, включая модификацию адресов команд и данных;

- операции специальной арифметики включают нормализацию, округление, масштабирование и другие действия, специфичные для конкретных вычислительных задач;

- логические операции реализуются на уровне побитовых преобразований и служат основой для выполнения операций сравнения, маскирования и фильтрации данных;

- операции над алфавитно-цифровыми полями обеспечивают обработку символьной информации, что особенно важно при реализации функций ввода-вывода и взаимодействии с пользователем.

2. По способу представления чисел:

- для чисел с фиксированной точкой;
- для чисел с плавающей точкой.

3. По способу действия над операндами:

- последовательные — выполняют операции по битам (менее производительные, но проще в реализации);

- параллельные — обрабатывают все биты одновременно, обеспечивая высокую скорость вычислений.

4. По характеру использования элементов и узлов:

- блочные — каждая операция реализована в виде отдельного аппаратного узла, что обеспечивает быстрое действие, но требует значительных ресурсов;

- многофункциональные — переключаются между режимами, обеспечивая экономию ресурсов при умеренной скорости.

Примером простой, но важной операции является сложение чисел с фиксированной точкой в дополнительном коде [3]. Благодаря особенностям формата операция выполняется без дополнительной коррекции, что упрощает аппаратную реализацию и снижает вероятность ошибок.

Логические операции, в свою очередь, проводятся побитово и не зависят от формата представления чисел. Они активно применяются при реализации условных переходов, фильтрации данных и других задач логической обработки [3].

### Разработка симулятора арифметико-логического устройства

Приложение реализовано на Python [11–13], графический интерфейс — на PyQt5 [14, 15]. Структура — модульная: вычислительное ядро (арифметика и логика в прямом, обратном и дополнительном

кодах), модуль визуализации пошаговых операций и тренажерный модуль.

Вычислительное ядро изолировано в модуле и оперирует фиксированной разрядностью 5 бит (1 знаковый + 4 модульных). Центральным элементом вычислительного ядра является функция `calculate_process`, выполняющая кодирование входных операндов в выбранном формате представления, выбор и запуск алгоритма операции и возврат пошагового журнала вычислений, сформированного соответствующими процедурами. Для арифметических операций функция обрабатывает признак переполнения и возвращает сообщение о выходе результата за допустимый диапазон. Дополнительно реализована обработка некорректных параметров (неизвестный тип кода/операция) и ошибок кодирования.

Код функции `calculate_process`:

```
def calculate_process(d1: int, d2: int, code_type: str,
operation: str):
    enc_map = {
        "Прямой код": (from_int_direct, to_int_direct),
        "Обратный код": (from_int_ones, to_int_ones),
        "Дополнительный код": (from_int_twos, to_
int_twos)
    }
    if code_type not in enc_map:
        return «», «Ошибка: неизвестный тип кода»
    encode, decode = enc_map[code_type]
    try:
        a_bits = encode(d1)
        b_bits = encode(d2)
    except ValueError as e:
        return «», f«Ошибка кодирования: {e}»
    if operation == "Сложение":
        final, log, over = add_binary_strings(a_bits, b_bits,
code_type)
        return log, "Переполнение" if over else f"{final}
({decode(final)})"
    if operation == "Умножение":
        final, log, over = multiply_binary_strings(a_bits,
b_bits, code_type)
        return log, "Переполнение" if over else f"{final}
({decode(final)})"
```

```
if operation == "Деление":
    final, log, over = divide_binary_strings(a_bits,
b_bits, code_type)
    return log, "Переполнение" if over else f"{final}
({decode(final)})"
if operation == "Побитовое И":
    final, log = bitwise_and_strings(a_bits, b_bits,
code_type)
    return log, f"{final} ({int(final, 2)})"
if operation == "Побитовое ИЛИ":
    final, log = bitwise_or_strings(a_bits, b_bits, code_
type)
    return log, f"{final} ({int(final, 2)})"
if operation == «Побитовое ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ
ИЛИ»:
    final, log = bitwise_xor_strings(a_bits, b_bits,
code_type)
    return log, f"{final} ({int(final, 2)})"
return «», «Ошибка: неизвестная операция»
```

Поддерживаются три представления чисел: прямой, обратный и дополнительный коды. Рассмотрены парные функции кодирования/декодирования, валидация длины битовых строк и контроль диапазонов. Общая рабочая область значений ограничена интервалом  $[-15; 15]$  для предотвращения переполнения.

Валидация включает проверки разрядности, корректности кодов, границ диапазонов, а также специальных ситуаций (деление на ноль). Все операции возвращают как машиночитаемый результат, так и развернутый текстовый журнал, что облегчает применение в учебных целях и разбор ошибок. Реализация симулятора АЛУ представлена в виде программного решения с пользовательским интерфейсом, обеспечивающим интерактивное обучение и самопроверку. Таким образом, одной из отличительных особенностей разработанного приложения является реализация практического режима, направленного на закрепление теоретических знаний студентов.

Режим калькулятора представляет собой инструмент для проведения вычислений двух целых чисел в трех системах кодирования. Режим практики представлен в виде интуитивно понятного

графического интерфейса (рис. 1), который позволяет пользователю взаимодействовать с заданием.

В режиме калькулятора поддерживается выбор наиболее распространенных форм представления чисел в цифровых устройствах: прямой код, обратный код, дополнительный код. Каждый из перечисленных форматов имеет свою особенность обращения с положительными и отрицательными числами, особенно при выполнении операций сложения и умножения.

Пользователь имеет возможность выбрать тип арифметической операции. В текущей версии приложения поддерживаются пять арифметических операций: сложение, умножение, побитовые И, ИЛИ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

Для примера работы калькулятора будет произведено суммирование чисел 2 и 3 в прямом коде в режиме калькулятора.

В поле ввода «Регистр 1» вводим цифру 3, в поле «Регистр 2» вводим цифру 2. Далее необходимо выбрать кодировку и операцию между регистрами.

При нажатии «Получить ответ» пользователь может получить подробный результат выполнения

операции. Программа автоматически генерирует пошаговое решение с итоговым ответом (рис. 2).

В случае затруднений пользователю доступна пошаговая инструкция к использованию калькулятора при нажатии кнопки «Помощь».

В практическом режиме пользователю необходимо решить 6 заданий, связанных с двоичным кодированием, за отведенное время, где условия заданий генерируются программой автоматически (значения регистров, операция, кодировка). После выполнения всех заданий выводится итоговое окно с результатами практики (рис. 3).

В случае неверного ответа пользователю будет дана возможность просмотреть верное решение задания.

### Заключение

Разработка интерактивного обучающего приложения для изучения двоичного кодирования представляет собой перспективное средство поддержки учебного процесса. Программа сочетает в себе теоретический материал, программный калькулятор, а также модуль практики с возможностью проверки

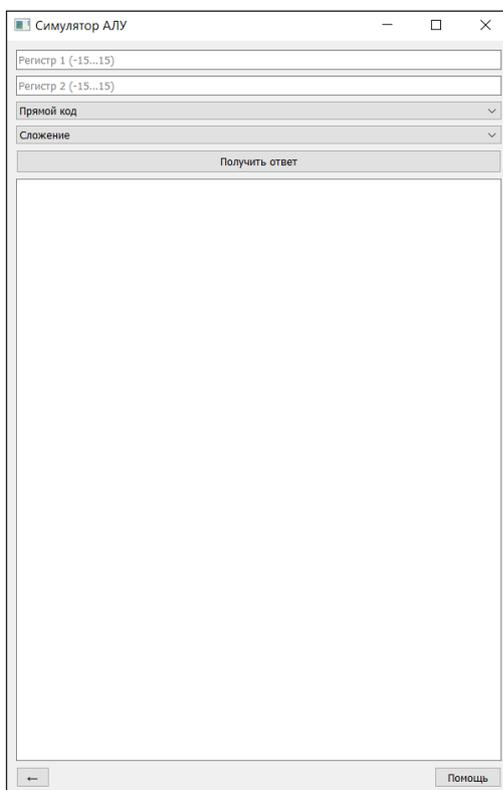


Рис. 1. Окно калькулятора

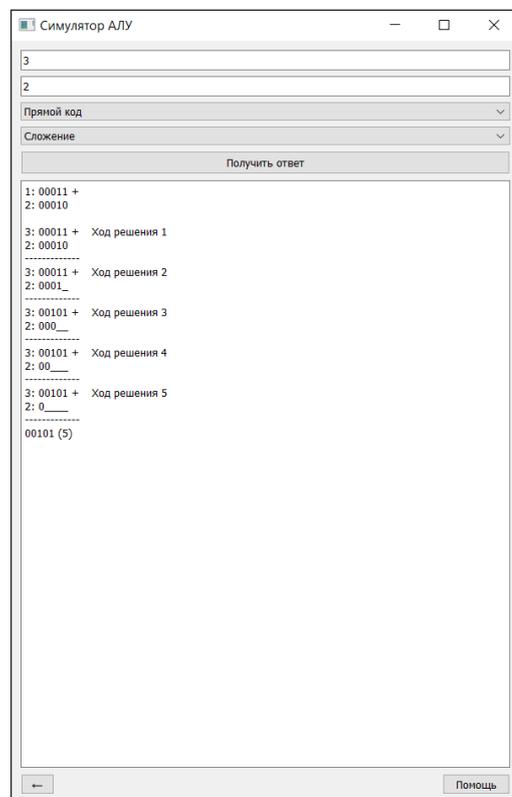


Рис. 2. Пример полученного ответа

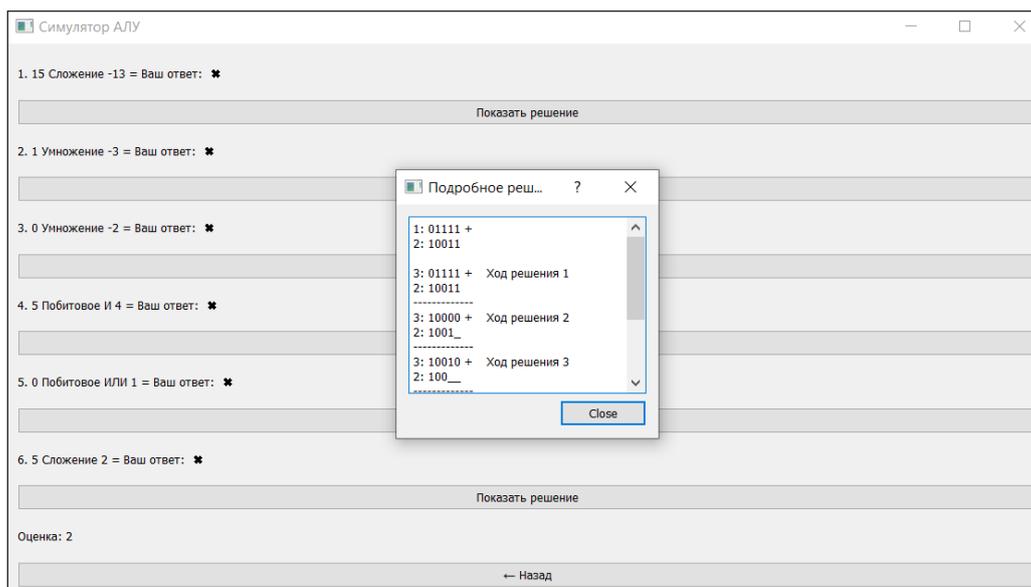


Рис. 3. Пример вывода окна с итогами практики

ответов. Комплексный подход ориентирован на развитие у студентов не только теоретических знаний, но и практических умений, что особенно важно для формирования прочных и полных представлений о принципах работы цифровых устройств.

Ожидается, что использование приложения в учебной среде будет способствовать улучшению

усвоения материала и формированию качественных навыков работы с двоичным кодом. В будущем планируются расширение возможностей, проведение эксперимента и интеграция программного продукта в учебные курсы для подтверждения его эффективности и получения методических рекомендаций по его использованию.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кодирование информации (двоичные коды): справочник / под ред. Н. Т. Березюка. Харьков: Вища школа, 1978. 252 с.
2. Чернецова Е. А. Теория информации и кодирования. Практикум. СПб.: Российский гос. гидрометеорологический ун-т, 2021. 172 с.
3. Каган Б. М. Электронные вычислительные машины и системы: учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 592 с.
4. Арифметико-логическое устройство // Желтов К. Ю. Проектирование процессоров RISC-V в среде Logisim и на языке Verilog в среде Quartus. URL: <http://riscv-alliance.ru/material/proektirovanie-procprocessorov-risc-v-v-srede-logisim-i-na-yazyke-verilog-v-srede-quartus> (дата обращения: 05.04.2025).
5. Максимов Н. В., Партыка Т. Л., Попов И. И. Архитектура ЭВМ и вычислительных систем: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Форум, 2013. 510 с.
6. Луцик Ю. А., Лукьянова И. В. Арифметические и логические основы вычислительной техники: учебное пособие. Минск: Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, 2014. 174 с.
7. Ситников С. Ю., Ситников Ю. К. Электронные вычислительные машины: Арифметика. Логика. Элементарная база: учебное пособие. Казань: Казанский гос. энергетический ун-т, 2015. 168 с.
8. Карпов А. В., Калабанов С. А., Ишмуратов Р. А. Основы цифровой электроники: учебное пособие. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2019. 75 с.
9. Харрис С. Л., Харрис Д. М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V = Digital Design and Computer Architecture: RISC-V Edition / пер. с англ. под ред. А. Ю. Романова. М.: ДМК Пресс, 2021. 810 с.
10. Одинец А. И. Цифровые устройства: конспект лекций. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2009. 64 с.

11. Сечина Г.П. Микропроцессорные средства: учебно-методическое пособие. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт, 2012. 60 с.
12. Python Documentation. URL: <http://docs.python.org> (дата обращения: 15.04.2025).
13. PyCharm Quick start guide. URL: <http://www.jetbrains.com/help/pycharm/quick-start-guide.html> (дата обращения: 15.04.2025).
14. Шаманов А.П. Системы счисления и представление чисел в ЭВМ: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. 52 с.
15. Qt for Python Documentation. URL: <http://doc.qt.io/archives/qtforpython-5> (дата обращения: 15.04.2025).

Дата поступления: 28.10.2025

Решение о публикации: 16.02.2026

## An Interactive Tool to Support the Study of the Theory and Practice of Working with Binary Code

- Maksim Gerasimov** — 3th year Bachelor's Degree in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: intellectual information systems, machine learning. E-mail: [maxger60@gmail.com](mailto:maxger60@gmail.com)
- Darya A. Zverkova** — 3th year Bachelor's Degree in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: binary coding, intellectual information systems. E-mail: [dzverkova50@gmail.com](mailto:dzverkova50@gmail.com)
- Emiliya E. Karpich** — 3th year Bachelor's Degree in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: information systems, binary coding. E-mail: [emiliya1104@gmail.com](mailto:emiliya1104@gmail.com)
- Rinat G. Gilvanov** — PhD in Military Sciences, Associate Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, virtual and augmented reality, immersive technologies. E-mail: [gilvanov1950@mail.ru](mailto:gilvanov1950@mail.ru)

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

**For citation:** Gerasimov M., Zverkova D.A., Karpich E. E., Gilvanov R. G. An Interactive Tool to Support the Study of the Theory and Practice of Working with Binary Code, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 51–58. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-51-58. (In Russian)

**Abstract.** *The modern information environment is tightly linked to the advancement of digital technologies based on the binary numeral system, thereby requiring a solid understanding of binary coding principles. Many learners find this subject challenging because of its abstract character and the substantial theoretical content it entails. **Purpose:** the present work seeks to create an interactive educational application aimed at improving the effectiveness of instruction on binary coding and at strengthening students' practical abilities in handling binary representations of numbers. **Methods:** the research employs methods of interactive educational system design, with the software implemented in Python using the PyQt5 framework. The resulting architecture comprises a theoretical reference module, a binary operation calculator, and a practical training mode with automated answer verification. **Results:** a fully functional application has been created, integrating both theoretical and practical aspects of studying binary coding. The calculator mode implements operations for addition, subtraction, multiplication, division, and bitwise transformations in direct, inverse, and complementary codes. The practical module ensures the automatic generation of tasks and provides formative feedback, which enhances*

material retention and the development of computational skills. **Practical significance:** the developed application can be used in educational institutions for teaching disciplines related to digital logic, computing technology, and computer architecture. The programme enhances the visibility of the educational process and provides interactive practice that aids in the reinforcement of theoretical knowledge through practical application.

**Keywords:** binary code, learning application development, interactivity, Python

## REFERENCES

1. Berezyuk N. T. (ed.) Kodirovanie informatsii (dvoichnye kody): spravochnik [Encoding Information (Binary Codes): A Reference Guide]. Kharkov, Vishcha Shkola Publishing House, 1978, 252 p. (In Russian)
2. Chernetsova E. A. Teoriya informatsii i kodirovaniya. Praktikum [Information and Coding Theory. Practical Exercises]. Saint Petersburg, Russian State Hydrometeorological University, 2021, 172 p. (In Russian)
3. Kagan B. M. Elektronnye vychislitelnye mashiny i sistemy: uchebnoe posobie dlya vuzov [Electronic Computing Machines and Systems: Educational Manual for Higher Education Institutions]. Moscow, Energoatomizdat Publishing House, 1991, 592 p. (In Russian)
4. Arifmetiko-logicheskoe ustroystvo [Arithmetic-Logic Unit]. In: Zheltov K. Yu. *Proektirovanie protsessorov RISC-V v srede Logisim i na yazyke Verilog v srede Quartus [Designing RISC-V Processors in the Logisim Environment and in Verilog Using Quartus]*. Available at: <http://riscv-alliance.ru/material/proektirovanie-procprocessorov-risc-v-v-srede-logisim-i-na-yazyke-verilog-v-srede-quartus> (accessed: April 15, 2025). (In Russian)
5. Maksimov N. V., Partyka T. L., Popov I. I. Arkhitektura EVM i vychislitelnykh sistem: uchebnyk [Architecture of Electronic Computing Machines and Systems: Textbook]. Moscow, Forum Publishing House, 2013, 510 p. (In Russian)
6. Lutsik Yu. A., Lukyanova I. V. Arifmeticheskie i logicheskie osnovy vychislitelnoy tekhniki: uchebnoe posobie [Arithmetic and Logical Foundations of Computer Engineering: Educational Manual]. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2014, 174 p. (In Russian)
7. Sitnikov S. Yu., Sitnikov Yu. K. Elektronnye vychislitelnye mashiny: Arifmetika. Logika. Elementnaya baza: uchebnoe posobie [Electronic Computing Machines: Arithmetic, Logic, and Element Basis: Educational Manual]. Kazan, Kazan State Power Engineering University, 2015, 168 p. (In Russian)
8. Karpov A. V., Kalabanov S. A., Ishmuratov R. A. Osnovy tsifrovoy elektroniki: uchebnoe posobie [Fundamentals of Digital Electronics: Educational Manual]. Kazan, Publishing House of the Kazan Federal University, 2019, 75 p. (In Russian)
9. Harris S. L., Harris D. M. Tsifrovaya skhemotekhnika i arkhitektura kompyutera: RISC-V [Digital Design and Computer Architecture: RISC-V Edition], Moscow, DMK Press Publishing House, 2021, 810 p. (In Russian)
10. Odinets A. I. Tsifrovye ustroystva: konspekt lektsiy [Digital Devices: Lecture Notes]. Omsk: Omsk State Technical University, 2009, 64 p. (In Russian)
11. Sechina G. P. Mikroprotsessornye sredstva: uchebno-metodicheskoe posobie [Microprocessor Tools: Educational and Methodological Manual]. Nizhnekamsk, Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute, 2012, 60 p. (In Russian)
12. Python Documentation. Available at: <http://docs.python.org> (accessed: April 15, 2025).
13. PyCharm Quick start guide. Available at: <http://www.jetbrains.com/help/pycharm/quick-start-guide.html> (accessed: April 15, 2025).
14. Shamanov A. P. Sistemy schisleniya i predstavlenie chisel v EVM: uchebnoe posobie [Number Systems and Representation of Numbers in Electronic Computing Machines: Educational and Methodological Manual]. Yekaterinburg, Publishing House of the Ural Federal University, 2016, 52 p. (In Russian)
15. Qt for Python Documentation. Available at: <http://doc.qt.io/archives/qtforpython-5> (accessed: April 15, 2025).

Received: 28.10.2025

Accepted: 16.02.2026

УДК 371.67:004.738.5

## Разработка веб-сервиса для изучения алгоритмов двоичной арифметики с поддержкой вариативных методов вычислений

**Кутчиев Владимир Андреевич** — студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: веб-разработка, веб-дизайн, прикладная бинарная алгебра. E-mail: vova2400@yandex.ru

**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:** Кутчиев В. А., Забродин А. В. Разработка веб-сервиса для изучения алгоритмов двоичной арифметики с поддержкой вариативных методов вычислений // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 59–66. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-59-66

**Аннотация.** Рассматривается задача повышения эффективности изучения алгоритмов двоичной арифметики в рамках подготовки специалистов в области информатики и вычислительной техники. **Цель:** разработка образовательного веб-сервиса, предназначенного для комплексного изучения алгоритмов двоичной арифметики. **Методы:** в качестве методологической основы используются анализ существующих программных решений и проектирование модульной архитектуры веб-приложения. **Результаты:** в отличие от существующих аналогов, разработанный сервис реализует полный цикл преобразований и вычислений — от перевода чисел в прямые, обратные и дополнительные коды до выполнения базовых арифметических операций с поддержкой вариативных вычислительных методов. Ключевым преимуществом решения является модуль генерации детализированных пошаговых решений, способствующих углубленному освоению алгоритмических основ. Научная новизна работы заключается в создании унифицированной программной платформы, сочетающей вариативные методы двоичных вычислений с алгоритмически прозрачной визуализацией каждого этапа обработки данных. **Практическая значимость:** результаты проведенного сравнительного анализа позволяют говорить о целесообразности использования разработанного сервиса в образовательной практике. Комплексный характер реализованных функций и высокая степень детализации вычислительных процессов создают предпосылки для его применения при изучении дисциплин, связанных с архитектурой ЭВМ и теоретическими основами информатики.

**Ключевые слова:** двоичные числа, двоичная арифметика, системы счисления, веб-сервис, образовательные технологии, визуализация вычислений, алгоритмы

**2.3.5** — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки).

### Введение

Изучение двоичной арифметики является фундаментальной составляющей подготовки специалистов в области информатики и вычислительной техники. Ключевой сложностью для обучающихся является не только получение корректного результата вычислений, но и глубокое понимание

алгоритмических основ каждого этапа преобразования и выполнения операций.

При этом особую методическую трудность представляет усвоение операций с двоичными представлениями чисел в различных кодах (прямом, обратном и дополнительном), а также понимание влияния формата представления данных на ход и результат вычислений. На практике это нередко приводит к формальному воспроизведению алгоритмов без осознания их внутренней логики, что снижает качество усвоения материала и затрудняет дальнейшее изучение архитектуры вычислительных систем.

Анализ существующих программных решений [1, 2] показывает, что они, как правило, ориентированы либо на мгновенное получение итогового результата, либо на демонстрацию ограниченного набора операций с пошаговыми пояснениями. Отсутствие единого ресурса, охватывающего полный спектр операций (включая преобразования между различными системами кодирования и вариативные методы арифметических действий) с алгоритмическим разбором, создает существенную проблему для системного освоения материала.

Таким образом, в образовательной практике формируется разрыв между теоретическим изложением алгоритмов двоичной арифметики и инструментальными средствами их практического освоения. Устранение данного разрыва требует использования программных решений, ориентированных не только на получение результата, но и на визуализацию и поэтапное объяснение вычислительных процессов.

Целью статьи является описание процесса разработки и функциональных возможностей веб-сервиса В.А.KVI, ориентированного на комплексное решение обозначенной проблемы. Работа носит прикладной исследовательский характер и опирается на сочетание анализа существующих программных средств, проектирования архитектуры веб-приложения и реализации вычислительных алгоритмов двоичной арифметики [3]. Веб-сервис при этом рассматривается не только как программный продукт, но и как инструмент методической поддержки учебного процесса, ориентированный

на поэтапное освоение алгоритмов и формирование устойчивых навыков работы с двоичными представлениями данных.

Задачи исследования:

- реализовать модули преобразования чисел между десятичной системой счисления и двоичными представлениями (прямой, обратный и дополнительный коды);
- разработать алгоритмы выполнения базовых арифметических операций (сложение, вычитание, умножение, деление) с поддержкой различных вычислительных методов;
- обеспечить генерацию детализированного пошагового объяснения для каждой операции;
- реализовать веб-интерфейс, интегрирующий все функциональные модули в единую удобную среду.

Научная новизна работы заключается в интеграции вариативных алгоритмов двоичной арифметики и сквозной пошаговой визуализации вычислительных процессов в рамках единого образовательного веб-сервиса.

### Архитектура и реализация веб-сервиса

Архитектура веб-сервиса В.А.KVI реализована в виде модульной системы, обеспечивающей расширяемость функционала и прозрачность выполнения вычислительных алгоритмов. Она основана на взаимодействии трех ключевых компонентов: модуля вычислительных алгоритмов, системы управления данными и интерактивного веб-интерфейса.

#### *Выбор технологического стека и обоснование*

Выбор технологического стека определялся задачей обеспечения надежной серверной логики, интерактивного пользовательского интерфейса и устойчивого хранения данных, необходимых для поддержки образовательного веб-сервиса. Базовый стек технологий формирует ядро системы, ее интерфейс и механизмы хранения данных.

В качестве основного языка реализации вычислительных алгоритмов был выбран Java, что обусловлено его строгой типизацией, переносимостью на другие устройства и наличием проверенных инструментов для построения надежной серверной

логики. Для развертывания веб-интерфейса применяются HTML, CSS и TypeScript, что позволяет создать кросс-платформенное и отзывчивое клиентское приложение. В качестве системы управления базами данных для надежного хранения информации о пользователях и их сессиях используется PostgreSQL, обеспечивающая целостность и согласованность данных.

### **Функциональные модули системы**

Функциональная структура сервиса организована в виде набора взаимосвязанных модулей, каждый из которых отвечает за отдельный этап работы с данными — от ввода и преобразования чисел до выполнения вычислений и анализа результатов, интегрированных через единый веб-интерфейс.

Модуль ввода и валидации данных обеспечивает корректную обработку исходных числовых представлений, включая ввод чисел в десятичной и двоичной системах с указанием знака, а также работу с целочисленными значениями и числами с плавающей точкой. Реализованные механизмы валидации учитывают разрядность представления и допустимые диапазоны значений, что позволяет предотвратить некорректные вычисления на последующих этапах обработки.

Модуль преобразования систем счисления и кодов реализует перевод чисел между десятичной и двоичной системами с поддержкой различных форматов представления (прямого, обратного и дополнительного кодов). Особенностью модуля является визуализация процесса преобразования с отображением промежуточных этапов, что позволяет проследить алгоритмическую логику формирования двоичных представлений.

Модуль арифметических операций реализует базовые операции двоичной арифметики (сложение, вычитание, умножение и деление) с возможностью выбора формата представления чисел и алгоритма вычислений [4]. Такая организация позволяет сопоставлять различные методы выполнения операций и анализировать их особенности в зависимости от выбранного кода и типа данных.

Модуль генерации пошаговых решений обеспечивает поэтапное представление выполнения

арифметических операций, включая визуализацию состояний регистров и отображение действий, выполняемых на каждом шаге алгоритма. Формирование промежуточных результатов позволяет проследить динамику вычислительного процесса и проверить корректность выполнения операций.

Модуль управления пользователями и историей вычислений обеспечивает регистрацию и авторизацию пользователей, а также сохранение результатов выполненных операций. Реализация истории вычислений и функции экспорта результатов в формат PDF позволяет использовать сервис в образовательном процессе и при самостоятельной работе обучающихся.

Модуль управления подписками реализует механизм разграничения доступа к функциональности сервиса, при этом базовые возможности остаются доступными для образовательного использования. Такой подход обеспечивает устойчивость развития сервиса без ограничения его применения в учебных целях.

Совокупность описанных модулей формирует целостную функциональную среду [5], обеспечивающую последовательный переход от ввода и преобразования данных к выполнению вычислений и анализу их результатов.

### **Алгоритмическая база**

Алгоритмическая база сервиса определяет способы выполнения арифметических операций в двоичной системе и обработку числовых данных в различных форматах представления.

#### *Сложение и вычитание двоичных чисел*

Пользователь может вводить числа в десятичной или двоичной системе. Операции выполняются в простом, обратном или дополнительном кодах для чисел с фиксированной или плавающей точкой. Вычитание реализуется как сложение с противоположным знаком второго числа. Такая реализация позволяет наглядно продемонстрировать различия в обработке знаковых чисел в зависимости от выбранного формата представления. Теоретические основы операций описаны в [6, 7].

### Умножение и деление

Поддерживается ввод чисел в двоичной и десятичной системах с выбором формата представления (прямой, обратный, дополнительный код) и типа чисел (с фиксированной или плавающей точкой). Для умножения реализованы методы со сдвигом множимого и частичных произведений [8], для деления — алгоритмы с восстановлением остатка и без восстановления остатка [9]. Наличие нескольких алгоритмических подходов создает условия для их сопоставления и анализа особенностей выполнения операций в двоичной системе. Теоретические основы приведены в [9, 10].

Выбор и реализация нескольких алгоритмических подходов к выполнению арифметических операций обусловлены не стремлением к расширению функционала, а дидактической задачей сопоставления различных методов вычислений. Возможность поэтапного наблюдения за ходом выполнения алгоритмов в разных кодах и форматах представления чисел позволяет обучающимся выявлять принципиальные различия между методами и формировать более глубокое понимание внутренней логики двоичных вычислений.

### Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности разработанного веб-сервиса был проведен сравнительный анализ

существующих онлайн-инструментов, ориентированных на выполнение двоичных вычислений. В качестве критериев сравнения рассматривались функциональная полнота, степень алгоритмической прозрачности, наличие визуализации вычислительных процессов и возможности использования сервисов в образовательной практике. Выбор указанных критериев обусловлен задачей выявления не только вычислительных, но и дидактических преимуществ разрабатываемого решения.

Результаты сравнения с популярными онлайн-калькуляторами обобщены и представлены в табл. 1.

Как показывает анализ, ключевые преимущества разработанного сервиса перед аналогами заключаются в полном пошаговом объяснении решений и их детальной визуализации, что реализовано в модуле генерации пошаговых решений. Из рис. 1 видно, что вывод простой операции сложения не ограничивается одним ответом или кратким решением, как показано на рис. 2. Сервис демонстрирует введенную информацию, подготовительные шаги для начала выполнения основной операции, непосредственно сам процесс заданного действия с сопутствующими правилами, а также ответ с обратной проверкой, что важно для подтверждения правильности решения.

Таблица 1

Сравнительный анализ сервисов для двоичных вычислений

Критерии	Сервисы		
	В.А.KVI	RapidTables	Calculatori.ru
Пошаговое объяснение при решении	Полное	Отсутствует	Базовое
Визуализация	Детальная	Минимальная	Базовая
Модель распространения	Подписочная	Бесплатная	Бесплатная
Поддержка русского языка	Присутствует	Отсутствует	Присутствует
Поддержка разных методов вычисления	Присутствует	Отсутствует	Отсутствует
Экспорт в PDF	Присутствует	Отсутствует	Отсутствует
История вычислений	Присутствует	Отсутствует	Отсутствует



В отличие от рассматриваемых аналогов, ориентированных преимущественно на получение конечного числового результата, разработанный сервис акцентирует внимание на алгоритмической стороне вычислений. Такая организация вывода позволяет использовать сервис не только как вычислительный инструмент, но и как средство формирования алгоритмического мышления, что имеет принципиальное значение при изучении двоичной арифметики в рамках базовых и профильных дисциплин.

К дополнительным преимуществам относятся поддержка различных методов вычислений, экспорт в PDF, ведение истории вычислений и наличие русскоязычного интерфейса.

Наряду с отмеченными преимуществами разработанный сервис функционирует в рамках ряда ограничений, обусловленных текущим этапом его реализации. Использование подписочной модели распространения связано с необходимостью поддержки и развития функциональности сервиса, а перечень реализованных функций отражает выбранный фокус на базовых алгоритмах двоичной арифметики.

## Заключение

Результатом выполненного исследования является программная реализация образовательного веб-сервиса В.А.KVI, обеспечивающая комплексное изучение алгоритмов двоичной арифметики на основе вариативных вычислительных методов.

В ходе работы показано, что сочетание модульной архитектуры, функциональной декомпозиции и алгоритмической вариативности позволяет рассматривать разработанный сервис не только как средство выполнения вычислений, но и как инструмент методической поддержки учебного процесса. Реализация пошагового представления вычислительных процедур и визуализация промежуточных состояний создают условия для формирования у обучающихся устойчивого понимания внутренней логики двоичных операций и особенностей их выполнения в различных форматах представления чисел.

Проведенный сравнительный анализ с существующими программными решениями позволяет сделать вывод о том, что ключевым отличием сервиса В.А.KVI является акцент на алгоритмической прозрачности и возможности сопоставления различных методов выполнения арифметических операций. Такой подход расширяет дидактический потенциал сервиса и повышает его применимость в рамках изучения дисциплин, связанных с теоретическими основами информатики и архитектурой вычислительных систем.

Перспективы дальнейшего развития связаны с расширением набора реализуемых алгоритмов, углублением аналитических и визуализационных средств, а также с интеграцией сервиса в цифровые образовательные среды и учебные курсы профильной направленности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Binary Calculator // RapidTables. URL: <http://www.rapidtables.com/calc/math/binary-calculator.html> (дата обращения: 02.11.2025).
2. Калькулятор чисел в различных системах счисления // Calculatori.ru. URL: <http://calculatori.ru/allsystem.html> (дата обращения: 02.11.2025).
3. Parhami B. Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Designs. Second Edition. New York: Oxford University Press, 2010. 672 p.
4. Mano M. M., Ciletti M. D. Digital Design: With an Introduction to the Verilog HDL, VHDL, and SystemVerilog. 6th Edition. Upper Saddle River (NJ): Pearson Education, 2017. 720 p.
5. Sommerville I. Software Engineering. 10th Edition. Boston (MA): Pearson Education, 2015. 816 p.
6. Паттерсон Д. А., Хеннесси Дж. Л. Архитектура компьютера и проектирование компьютерных систем. Четвертое издание = Computer Organization and Design. Fourth Edition / пер. с англ. Н. Вильчинского. СПб.: Питер, 2012. 784 с.
7. Таненбаум Э. С., Остин Т. Архитектура компьютера. Шестое издание = Structured Computer Organization. Sixth Edition / пер. с англ. Е. Матвеева. СПб.: Питер, 2021. 816 с.

8. Савельев А. Я. Основы информатики: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. И. Э. Баумана, 2001. 328 с.
9. Ercegovac M. D., Lang T. Digital Arithmetic. San Francisco (CA): Morgan Kaufmann, 2003. 769 p.
10. Harris S. L., Harris D. M. Digital Design and Computer Architecture: RISC-V Edition. Cambridge (MA): Morgan Kaufmann, 2022. 732 p.

Дата поступления: 22.11.2025

Решение о публикации: 06.02.2026

## Development of a Web Service for Studying Binary Arithmetic Algorithms with Support for Variable Calculation Methods

**Vladimir A. Kutchiev** — 3th year Bachelor's Degree in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: web development, web design, applied binary algebra. E-mail: vova2400@yandex.ru

**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:** Kutchiev V. A., Zabrodin A. V. Development of a Web Service for Studying Binary Arithmetic Algorithms with Support for Variable Calculation Methods, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 59–66. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-59-66. (In Russian)

**Abstract.** *This paper addresses the challenge of enhancing the efficiency of studying binary arithmetic algorithms within the framework of training specialists in the field of computer technology. **Purpose:** the goal is to develop an educational web service designed for a comprehensive study of binary arithmetic algorithms. **Methods:** the methodological foundation is based on the analysis of existing software solutions and the design of a modular architecture for the web application. **Results:** unlike existing counterparts, the developed service implements a complete cycle of transformations and calculations, ranging from converting numbers into direct, reverse, and complement codes to executing basic arithmetic operations with support for variable computational methods. A key advantage of this solution is the module for generating detailed step-by-step solutions, which facilitates a deeper understanding of algorithmic principles. The scientific novelty of the work lies in the creation of a unified software platform that combines variable methods of binary computation with algorithmically transparent visualization of each stage of data processing. **Practical significance:** the results of a comparative analysis affirm the feasibility of using the developed service in educational practice. The comprehensive nature of the implemented functions and the high degree of detail in the computational processes create prerequisites for its application in the study of disciplines related to computer architecture and the theoretical foundations of computer science.*

**Keywords:** *binary numbers, binary arithmetic, number systems, web service, educational technologies, visualization of calculations, algorithms*

## REFEENCES

1. Binary Calculator, *RapidTables*. Available at: <http://www.rapidtables.com/calc/math/binary-calculator.html> (accessed: November 02, 2025).
2. Kalkulyator chisel v razlichnykh sistemakh schisleniya [Calculator for Numbers in Different Numeral Systems], *Calculatori.ru*. Available at: <http://calculatori.ru/allsystem.html> (accessed: November 02, 2025). (In Russian)
3. Parhami B. Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Designs. Second Edition. New York, Oxford University Press, 2010, 672 p.
4. Morris Mano M., Ciletti M.D. Digital Design: With an Introduction to the Verilog HDL, VHDL, and SystemVerilog. Sixth Edition. Upper Saddle River (NJ), Pearson Education, 2017, 720 p.
5. Sommerville I. Software Engineering. Tenth Edition. Boston (MA), Pearson Education, 2015, 816 p.
6. Patterson D.A., Hennessy J.L. Архитектура компьютера и проектирование компьютерных систем. Четвертое издание [Computer Organization and Design. Fourth Edition]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2012, 784 p. (In Russian)
7. Tanenbaum A. S. Austin T. Архитектура компьютера. Шестое издание [Structured Computer Organization. Sixth Edition]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2021, 816 p. (In Russian)
8. Savelyev A. Ya. Osnovy informatiki: uchebnik dlya vuzov [Fundamentals of Computer Science: A Textbook for Institutions of Higher Education]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2001, 328 p. (In Russian)
9. Ercegovic M. D., Lang T. Digital Arithmetic. San Francisco (CA), Morgan Kaufmann, 2003, 769 p.
10. Harris S.L., Harris D.M. Digital Design and Computer Architecture: RISC-V Edition. Cambridge (MA), Morgan Kaufmann, 2022, 732 p.

Received: 22.11.2025

Accepted: 06.02.2026

УДК 681.586

## Интеллектуальные датчики и особенности их применения в ракетно-космической технике

**Лобанов Антон Андреевич<sup>1</sup>**

— курсант кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации. Научные интересы: измерительные системы, искусственный интеллект, повышение точности средств телеизмерений. E-mail: tosha.lobanov03@mail.ru

**Козырев Геннадий Иванович<sup>1</sup>**

— д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации. Научные интересы: измерительные системы, искусственный интеллект, повышение точности средств телеизмерений. E-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич<sup>1,2</sup>**

— д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры математического и программного обеспечения; профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Лобанов А. А., Козырев Г. И., Хомоненко А. Д. Интеллектуальные датчики и особенности их применения в ракетно-космической технике // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 67–80. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-67-80

**Аннотация.** Проводится комплексный анализ архитектуры, функциональных возможностей и метрологических характеристик интеллектуальных датчиков, а также разработка метода повышения точности измерений. **Цель:** комплексный анализ интеллектуальных датчиков (ИД) применительно к изделиям ракетно-космической техники (РКТ) с детальной проработкой метода повышения точности измерений на основе введения структурной избыточности. **Методы:** включают системный анализ архитектуры и функций ИД и описание процедуры текущей (в процессе эксплуатации) идентификации параметров ИД при неизвестных входных сигналах. **Результаты:** показано, что применение ИД с функциями самоадаптации и метрологического самоконтроля принципиально меняет архитектуру распределенных систем управления РКТ. Разработаны рекомендации по выбору протоколов связи для различных подсистем РКТ. **Практическая значимость:** заключается в формировании критериев выбора и проектирования ИД, а также в предложении математического аппарата для создания ИД с функцией метрологического самоконтроля, что необходимо для повышения автономности, надежности и точности измерений в изделиях РКТ.

**Ключевые слова:** измерительные системы, искусственный интеллект, самодиагностика, микропроцессорная обработка, системы на кристалле, протоколы связи, распределенные системы управления

**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

Современные сложные технические системы, в частности в ракетно-космической отрасли, функционируют в условиях воздействия многочисленных возмущающих факторов при жестких ограничениях по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению, а также требований максимальной автономности. Обеспечение требуемого качества и надежности управления в таких условиях является критически важной задачей, которая не может быть полноценно решена с применением традиционных средств измерений.

Ключевой проблемой при создании таких систем является противоречие между ростом объемов измерительной информации и ограниченной пропускной способностью каналов связи, а также вычислительными ресурсами центральных процессоров. Традиционные датчики, представляющие лишь первичные аналоговые сигналы или «сырые» цифровые данные, становятся узким местом в системах, где критически важны быстрая локальная обработка информации, самодиагностика и адаптация к изменяющимся условиям в реальном времени.

Разрешение данной проблемы стало возможным с появлением интеллектуальных датчиков (ИД) — принципиально нового класса измерительных преобразователей, созданных благодаря бурному развитию интегральной схемотехники и микропроцессорной техники. ИД представляют собой совокупность аппаратных и программных средств, функционально объединяющих в одном корпусе первичный преобразователь, микропроцессор и средства коммуникации. Это позволяет выполнять операции по преобразованию, коррекции и повышению достоверности измерительной информации непосредственно в месте ее возникновения.

Целью статьи является комплексный анализ архитектуры, функциональных возможностей и метрологических характеристик ИД, а также оценка потенциала их применения в изделиях ракетно-космической техники (РКТ) для повышения автономности, надежности и точности измерений.

## Анализ интеллектуальных датчиков

### *Понятие и определение интеллектуального датчика*

Понятие ИД сформировалось в результате развития микроэлектроники, позволившей интегрировать в один корпус с чувствительным элементом аналого-цифровые преобразователи и микропроцессоры. В отличие от простых интегральных датчиков, где объединение элементов направлено на линеаризацию и термокомпенсацию, ИД обладают расширенным набором функций.

Согласно [1] под интеллектуальным датчиком понимается адаптивный датчик с функцией метрологического контроля. Адаптивный датчик — это датчик, параметры и/или алгоритмы работы которого в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов содержащихся в нем преобразователей. В общем случае ИД предназначен для выполнения следующих задач:

- автоматическая коррекция погрешности;
- самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике;
- самообучение;
- взаимодействие с техническими подсистемами для передачи информации о результатах оператору через интерфейс технических подсистем.

Таким образом, ИД — это не просто измеритель, а сложное устройство, способное к адаптации, самодиагностике и взаимодействию с системой управления [2].

### *Типы интеллектуальных датчиков*

Прямая формализованная классификация ИД в виде единого нормативного перечня в отечественной практике отсутствует. Их ключевые отличительные функции и признаки определяются основополагающим стандартом терминологии. ГОСТ устанавливает, что ИД — это устройство, выполняющее функции преобразования измеряемой величины и обладающее одним или несколькими из следующих свойств:

- способность к самоадаптации — свойство автономно изменять алгоритмы функционирования

или параметры для сохранения или улучшения характеристик при изменении внешних условий;

- способность к самокалибровке — свойство выполнять процедуру калибровки, включая корректировку градуировочной характеристики без участия оператора;

- наличие встроенной диагностики — свойство отслеживать состояние компонентов и выявлять отклонения от нормального функционирования.

На практике, исходя из данных определений, сложилась функциональная типология ИД по доминирующему дополнительному свойству: самоадаптирующиеся, самокалибрующиеся, датчики со встроенной диагностикой и комбинированные.

В области разработки бортовых радиоэлектронных комплексов специального назначения на основе внутренних стандартов и технической практики профильных организаций применяется ведомственная классификация по целевому применению и условиям эксплуатации. В ее рамках, в частности, выделяется подкласс бортовых интеллектуальных телеметрических датчиков, предназначенных для работы в составе изделий РКТ в условиях воздействия комплекса дестабилизирующих факторов.

#### **Функции интеллектуального датчика**

Функциональные возможности ИД, определяемые ГОСТ и современной практикой, включают [3–5]:

- коррекцию статических и динамических характеристик: автоматическое устранение систематических погрешностей (нелинейность, гистерезис, влияние температуры);

- самодиагностику и контроль исправности: обнаружение внутренних неисправностей, обрывов или коротких замыканий линий связи;

- вычисление вторичных параметров (например, расчет расхода жидкости или газа по перепаду давления);

- хранение данных: возможность хранить калибровочные коэффициенты, серийный номер, историю ошибок, метрологический паспорт в своей памяти;

- связь и взаимодействие: поддержка промышленных сетевых протоколов (HART, Profibus, Modbus, OPC UA) для интеграции в АСУ ТП;

- удаленную настройку и конфигурирование: дистанционное изменение диапазонов измерений, порогов срабатывания и других параметров.

ИД позволяет формировать поток данных с необходимой достоверностью на основе анализа большого числа результатов отдельных относительно недостоверных измерений.

#### **Принцип работы интеллектуального датчика**

ИД представляет собой электронное устройство, основанное на объединении чувствительных элементов, схем преобразования сигналов и средств микропроцессорной техники. Использование микропроцессоров непосредственно в составе ИД является основой для улучшения его метрологических и эксплуатационных характеристик.

Принцип работы строится на последовательном преобразовании сигнала, которое включает в себя следующие этапы:

1. Физическая величина воздействует на первичный чувствительный элемент.

2. Полученный аналоговый сигнал усиливается и фильтруется.

3. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) оцифровывает сигнал.

4. Микропроцессор обрабатывает цифровые данные по заданным алгоритмам: выполняет коррекцию погрешностей, линеаризацию, вычисления, самодиагностику.

5. Обработанная информация передается во внешнюю систему через цифровой интерфейс.

Одним из ключевых принципов интеллектуального подхода является перенос функциональной нагрузки с механических узлов на перепрограммируемые электронные и информационные компоненты.

**Вывод.** Принцип работы ИД основан на тесной интеграции измерительной и вычислительной частей в едином устройстве. Это позволяет получать первичный, зашумленный, с нелинейными преобразованиями сигнал от чувствительного элемента в виде точного, готового к использованию цифрового информационного продукта, обладающего высокой достоверностью и обогащенного данными о состоянии самого датчика.

### Структурная схема интеллектуального датчика

Структурная схема ИД варьируется в зависимости от типов первичных измерительных преобразователей. Достаточно общая развернутая структурная схема ИД представлена на рис. 1 [3].

Приведенная схема демонстрирует, что ИД является сложной микропроцессорной системой, объединяющей измерительные, вычислительные и коммуникационные функции.

#### Режимы работы интеллектуального датчика

Режимы работы являются ключевым аспектом интеллектуальности ИД, позволяя гибко управлять энергопотреблением, приоритетами и функциями. Следует назвать следующие режимы работы ИД [3, 6]:

1. Номинальный (рабочий) режим. Штатное выполнение всех измерительных и вычислительных функций с передачей данных.
2. Режим пониженного потребления. Перевод микропроцессора и периферии в состояние минимального энергопотребления с возможностью пробуждения по таймеру или команде. Критически важен для автономных систем.
3. Режим самодиагностики. Проверка исправности измерительного тракта, памяти и компонентов по команде или расписанию.

4. Режим калибровки и конфигурации. Позволяет загружать новые калибровочные коэффициенты, менять диапазоны измерений и настраивать параметры.

5. Режим тревоги (событий). Немедленная и самостоятельная отправка аварийного сообщения при превышении заданных порогов, без ожидания опроса.

6. Буферный режим (регистрации данных). Накопление данных во внутренней памяти для последующей передачи, например при отсутствии связи.

7. Резервный режим (горячий резерв). Работа в паре с другим ИД, где один активен, а второй находится в «горячем» резерве, готовый к мгновенному включению.

Эти режимы часто комбинируются, что позволяет создавать гибкие и адаптивные измерительные системы.

#### Протоколы сети интеллектуальных датчиков

Для связи ИД с системой управления используется широкий спектр проводных и беспроводных протоколов [7]:

1. Проводные протоколы:
  - Modbus: широко распространенный промышленный протокол для связи с ПЛК (программируемый логический контроллер);



Рис. 1. Структурная схема интеллектуального датчика

- HART (Highway Addressable Remote Transducer): протокол, позволяющий передавать цифровые данные поверх аналогового сигнала 4–20 мА;

- Profibus, Profinet, EtherCAT: высокоскоростные протоколы для задач автоматизации в реальном времени;

- CAN (Controller Area Network): надежный протокол, популярный в автомобильной и аэрокосмической отраслях;

- IO-Link: протокол «точка-точка» для подключения датчиков и исполнительных механизмов.

## 2. Беспроводные протоколы:

- Zigbee: для сетей с низким энергопотреблением и поддержкой Mesh-топологии;

- BLE (Bluetooth Low Energy): для передачи данных на короткие расстояния;

- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network): для организации долгодействующих сетей с большим радиусом действия;

- WirelessHART: беспроводная версия протокола HART.

Выбор протокола зависит от требований к скорости, надежности, расстоянию, энергопотреблению и стоимости.

## **Протоколы обмена интеллектуальных датчиков**

Протоколы обмена определяют правила и форматы взаимодействия ИД с контроллерами. Различают несколько видов обмена:

- циклический обмен: регулярная передача процессных данных (измеренных значений);

- ациклический обмен: передача параметров или событий по запросу (например, для изменения настроек);

- комбинированный обмен: одновременная передача аналоговой и цифровой информации.

Ключевые стандарты [8, 9]:

- IEC 61131-9 — стандартизирует технологию ввода-вывода для датчиков и исполнительных механизмов;

- ISO/IEC/IEEE 21450:2010 — определяет интерфейс ИД и форматы электронной таблицы данных преобразователя (ЭТДП), что позволяет унифицировать описание возможностей датчика.

Реализация протоколов может быть аппаратной (специализированные контроллеры) или программной. Важным аспектом является безопасность, обеспечиваемая синхронизацией сообщений и контролем времени их поступления.

## **Метрологические характеристики интеллектуальных датчиков**

Использование ИД кардинально меняет подход к обеспечению точности и надежности измерений. Несмотря на то что точность первичного преобразователя в реальных условиях может ухудшаться (например, с 0,25 до 1% под влиянием внешних факторов), ИД существенно компенсирует повышение точности за счет внутренних вычислений. Алгоритмы позволяют [3]:

- корректировать начальное смещение и крутизну характеристики;

- линеаризовать статическую характеристику табличным методом или с помощью полиномов;

- реализовывать дифференциальные и адаптивные методы коррекции возмущений.

ИД надежнее традиционных датчиков благодаря:

- упрощению измерительного преобразователя за счет программной коррекции его недостатков;

- минимизации аналоговой части — основного источника неисправностей;

- введению систем автоматического контроля старения компонентов (перенапряжения, перегрев);

- возможности автоматической самокалибровки по встроенным или внешним эталонам.

Кроме того, ИД предоставляют доступ к богатой внутренней диагностической информации (напряжения питания, история ошибок, дата последней калибровки), что переводит техническое обслуживание на прогностический уровень.

## **Требования, предъявляемые к интеллектуальным датчикам**

При использовании в ответственных системах, таких как ракетно-космическая техника, к ИД предъявляются повышенные требования, направленные на обеспечение функциональной безопасности. Основные из них включают:

1. Избыточность и резервирование. Для ответственных функций ИД должны иметь резервные конфигурации (например, режим «горячего» резерва).

2. Функциональное разделение. Одиночная неисправность не должна одновременно затрагивать функции управления, сигнализации и аварийной остановки.

3. Безопасность отказа. Любая неисправность должна приводить систему в predetermined безопасное состояние с наименьшими последствиями.

4. Самоконтроль. ИД должны обнаруживать неисправности датчиков, аппаратного и программного обеспечения.

5. Надежное электропитание. Требуется использование энергонезависимой памяти и бесперебойных источников питания с контролем их исправности.

6. Защита от несанкционированного доступа. Изменение параметров и конфигурации должно быть доступно только подготовленному персоналу с использованием паролей или физических ключей.

7. Ремонтопригодность и защита от ошибок при монтаже. Конструкция должна обеспечивать легкий доступ для ремонта, а разъемы должны быть защищены от неправильного подключения.

8. Работа в реальном времени. Время отклика ИД должно соответствовать динамическим постоянным времени обслуживаемого оборудования.

### **Системы на кристалле (SoC)**

Современные интеллектуальные датчики все чаще строятся на основе систем на кристалле (System-on-a-Chip, SoC). SoC — это интегральная схема, которая объединяет на одном кремниевом кристалле все или большинство компонентов вычислительной системы.

Ключевые компоненты SoC для ИД [10]:

1. Процессорное ядро (central processing unit, CPU): архитектуры ARM Cortex-M (для энергоэффективных задач) или Cortex-A (для сложных ОС и алгоритмов).

2. Периферийные интерфейсы: встроенные АЦП, ЦАП, интерфейсы I2C, SPI, UART, Ethernet, CAN, а также радиомодули (Wi-Fi, BLE, LoRa).

3. Специализированные аппаратные ускорители:

- цифровые сигнальные процессоры (digital signal processor, DSP): для высокоскоростного выполнения операций цифровой фильтрации и быстрого преобразования Фурье (БПФ);

- нейропроцессоры (neural processing unit, NPU): для эффективного выполнения алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта (TinyML) непосредственно на датчике.

Преимущества SoC для ИД:

- компактность и снижение стоимости за счет интеграции;

- высокая энергоэффективность;

- рост производительности благодаря специализированным ускорителям;

- повышенная надежность (меньше внешних компонентов — меньше точек отказа).

**Вывод.** Использование SoC является естественным и прогрессивным этапом эволюции ИД. Главное их отличие от простых микроконтроллеров — в интеграции специализированных вычислительных блоков (DSP, NPU) на одном кристалле с процессором и периферией. Они характерны тем, что превращают датчик из устройства, которое лишь собирает данные, в устройство, которое способно интеллектуально их обрабатывать с высокой скоростью и малым энергопотреблением, реализуя сложные алгоритмы, включая искусственный интеллект, непосредственно «на краю» сети (edge computing).

### **Алгоритмы обработки данных в интеллектуальных датчиках**

Алгоритмы, выполняемые микропроцессором ИД, являются сутью его интеллектуальности. Их можно разделить на несколько уровней:

1. Базовые алгоритмы:

- цифровые фильтры: скользящее среднее (для сглаживания), медианный фильтр (для подавления импульсных помех), фильтр Калмана (для оптимальной оценки состояния в условиях шума);

- калибровка и компенсация: линейная калибровка (коррекция смещения и усиления), термокомпенсация (учет влияния температуры).

2. Алгоритмы среднего уровня:

- пороговая обработка с гистерезисом: для обнаружения событий и предотвращения «дребезга»;
- сжатие данных: дельта-кодирование, алгоритм «поворотной двери» (для снижения объема передаваемой информации);
- расчет производных величин (например, вычисление среднеквадратического значения (RMS) вибрации из данных акселерометра);
- быстрое преобразование Фурье: для перевода сигнала в частотную область (вибродиагностика, анализ гармоник).

Эти алгоритмы позволяют ИД не просто собирать данные, но и извлекать из них ценную информацию, принимая предварительные решения на месте.

**Особенности применения интеллектуальных датчиков в ракетно-космической технике**

В космической отрасли ИД решают задачу перехода от аналоговых и ручных методов сбора данных к цифровым, сетевым и интеллектуальным решениям. Это позволяет снизить массу и энергопотребление кабельной сети, повысить надежность данных, разгрузить центральный бортовой компьютер и обеспечить высокий уровень автономности аппарата.

**Основные подсистемы бортовой аппаратуры и использование в них ИД**

1. Система терморегулирования (СТР):

- задача: поддержание температурного режима;
- ИД: умные датчики температуры;
- функции: линеаризация и температурная компенсация, самодиагностика на обрывы, самостоятельный мониторинг пороговых значений, цифровая фильтрация помех.

2. Двигательная установка (ДУ) и система подачи топлива:

- задача: управление тягой, контроль расхода и давления;
- ИД: датчики давления, расходомеры, датчики положения клапанов;
- функции: коррекция показаний по температуре, вычисление массового расхода по перепаду давления, контроль герметичности по динамике изменения давления.

3. Система энергопитания (СЭП):

- задача: контроль состояния источников энергии;
- ИД: датчики тока, напряжения, контроля состояния аккумуляторов;
- функции: мониторинг состояния аккумуляторов, точное определение уровня заряда, прогнозирование отказов на основе анализа тенденций.

4. Система ориентации и стабилизации (СОС):

- задача: определение и поддержание положения ракеты или космического аппарата в пространстве;
- ИД: умные гироскопы, акселерометры, звездные датчики;
- функции: компенсация собственного дрейфа, слияние данных с нескольких сенсоров в инерциальном измерительном блоке (IMU) для вычисления ориентации, автоматическая калибровка в полете.

5. Система управления и контроля полезной нагрузки:

- задача: управление научными приборами и служебными системами;
- ИД: датчики положения антенн, солнечных батарей, датчики состояния оптики;
- функции: первичная обработка больших массивов научных данных на месте для экономии трафика, участие в адаптивном контуре управления (например, наведение антенны).

Конкретные решаемые задачи:

- повышение отказоустойчивости: система собственной реконфигурации при отказе одного ИД, используя данные соседних;
- снижение затрат на запуск: цифровые шины (CAN, SpaceWire) заменяют тяжелые жгуты аналоговых проводов;
- автономность: ИД самостоятельно реагирует на критические изменения (например, скачок давления), не дожидаясь команды с Земли;
- упрощение модернизации: ввод нового датчика в цифровую сеть значительно проще прокладки новых аналоговых линий.

**Анализ выбора протоколов для различных подсистем РКТ**

Для системного выбора протоколов связи при проектировании распределенных измери-

тельных систем на базе ИД разработана сравнительная характеристика (табл. 1), учитывающая специфические требования ракетно-космической техники.

1. Для критических систем (ДУ, система отделения ступеней):

- CAN — оптимален для распределенных систем управления с требованием детерминированного времени отклика;
- MIL-STD-1553 — для систем с повышенными требованиями к отказоустойчивости.

2. Для высокоскоростных систем:

- SpaceWire — выбор для научной аппаратуры с высокими потоками данных;
- EtherCAT — для сложных систем управления с жесткими временными требованиями.

3. Для вспомогательных систем:

- WirelessHART — для датчиков на подвижных элементах конструкции;
- LoRaWAN — для наземной инфраструктуры сопровождения.

**Вывод.** Применение интеллектуальных датчиков в изделиях РКТ является не просто техническим усовершенствованием, а стратегической необходимостью. Они трансформируются из пассивных источников данных в активные узлы бортовых систем, берут на себя значительную долю функций по обработке информации, диагностике и локальному управлению. Это краеугольный камень для создания полностью автономных, надежных и долговечных космических аппаратов, способных выполнять сложные миссии в условиях значительного удаления от Земли.

Таблица 1

Сравнительный анализ протоколов связи

Протокол	Скорость передачи	Дальность, м	Энергопотребление	Помехозащищенность	Применение в РКТ	Преимущества
						Недостатки
CAN	1 Мбит/с (CAN FD — до 8 Мбит/с)	до 40	Низкое	Высокая	Системы управления двигателем, топливные системы	Высокая надежность Низкая задержка Ограниченная дальность
SpaceWire	2–400 Мбит/с	до 10	Среднее	Высокая	Высокоскоростные научные приборы, системы ориентации	Экстремальная скорость Стандарт для космических применений Высокая стоимость
MIL-STD-1553	1 Мбит/с	до 300	Среднее	Очень высокая	Военные космические аппараты, критичные системы управления	Доказанная надежность Поддержка горячего резерва Высокая сложность
EtherCAT	до 100 Мбит/с	до 100	Среднее	Высокая	Системы управления полезной нагрузкой	Детерминированное время отклика Гибкая топология Сложность реализации
WirelessHART	250 кбит/с	до 100	Низкое	Средняя	Датчики вращающихся элементов, системы мониторинга	Отсутствие кабелей Self-organizing network Уязвимость к помехам
LoRaWAN	0,3–50 кбит/с	до 10 000	Ультранизкое	Высокая	Наземные телеметрические системы, мониторинг развертываемых элементов	Экстремальная дальность Минимальное энергопотребление Низкая скорость

**Совершенствование точностных характеристик измерительных преобразователей на базе интеллектуальных датчиков**

*Метод оперативной идентификации параметров структурно-избыточного датчика с применением предварительного функционального преобразования*

Рассмотрим измерительную систему, в которой функция преобразования основного канала структурно-избыточного датчика (СИД) аппроксимируется линейным полиномиальным уравнением:

$$y_1(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x(t), \tag{1}$$

где  $x(t)$  — входная измеряемая величина;  
 $y_1(t)$  — выходной сигнал основного измерительного канала;  
 $a_0(\xi), a_1(\xi)$  — коэффициенты статической характеристики, подверженные влиянию вектора неконтролируемых дестабилизирующих факторов  $\xi(t)$ .

Если принять за основу номинальные (паспортные) значения коэффициентов  $a_{0н}$  и  $a_{1н}$ , то реальные параметры удобно представить как совокупность номинальной составляющей и отклонения:

$$a_0(\xi) = a_{0н} + \Delta a_0(\xi); a_1(\xi) = a_{1н} + \Delta a_1(\xi), \tag{2}$$

где  $\Delta a_0(\xi)$  характеризует аддитивную составляющую погрешности (смещение нуля), а  $\Delta a_1(\xi)$  — мультипликативную составляющую (вариацию чувствительности), приведенные к выходу.

Для создания избыточности используется дополнительный канал, осуществляющий предварительное функциональное преобразование (ПФП) входного сигнала по степенному закону с показателем  $m$ . Его статическая характеристика имеет вид:

$$y_2(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x^m(t). \tag{3}$$

Наблюдаемые выходные сигналы  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  образуют систему двух уравнений (1) и (3) с тремя неизвестными:  $a_0(\xi), a_1(\xi)$  и  $x(t)$ . Для разрешимости системы необходимо третье уравнение, которое учитывает стохастическую природу сигналов (наличие шума  $\mu(t)$ ). В качестве такого уравнения выступает регрессионная связь между выходными сигналами каналов:

$$y_2(t) = b_0 + b_1 y_1(t) + \dots + b_m y_1^m(t). \tag{4}$$

Здесь коэффициенты  $b_0, b_1, \dots, b_m$  идентифицируются путем обработки временных реализаций

$$[y_2(t_i), y_1(t_i)], i = 1, 2, \dots, N, N > m + 1$$

с использованием метода наименьших квадратов (МНК).

Для установления связи между коэффициентами регрессии  $b_i$  и физическими параметрами датчика  $a_0(\xi)$  и  $a_1(\xi)$  выразим  $x(t)$  из (1) и подставим в (4):

$$y_2(t) = a_0(\xi) + \frac{(y_1(t) - a_0(\xi))^m}{a_1^{m-1}(\xi)}. \tag{5}$$

Применяя к выражению (5) формулу бинома Ньютона, раскладываем его в ряд:

$$\hat{b}_0 = \hat{a}_0 + \frac{(-1)^m a_0^m}{a_1^{m-1}}; \hat{b}_i = \frac{(-1)^{m-i} C_m^{m-i} a_0^{m-i}}{a_1^{m-i}}, \tag{6}$$

где  $C_m^{m-i}$  — биномиальный коэффициент,  $i = 1, \dots, m$ .

Полученное соотношение (6) позволяет выразить оценки коэффициентов регрессии через искомые параметры основного канала:

$$\begin{cases} \hat{b}_j = f_j(\hat{a}_0, \hat{a}_1), j \neq k, 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq m. \\ \hat{b}_k = g_k(\hat{a}_0, \hat{a}_1) \end{cases} \tag{7}$$

Таким образом, вычислив по экспериментальным данным оценки коэффициентов  $b_i$ , можно решить систему (7) и найти оценки  $\hat{a}_0(\xi)$  и  $\hat{a}_1(\xi)$ . Например, в частном случае для квадратичного преобразования ( $m = 2$ ) система (7) приобретает вид [11]:

$$\hat{b}_0 = \hat{a}_0 + \frac{\hat{a}_0^2}{\hat{a}_1}; \hat{b}_1 = -\frac{2\hat{a}_0}{\hat{a}_1}; \hat{b}_2 = \frac{1}{\hat{a}_1}.$$

Решение этой системы относительно параметров датчика находится аналитически:

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{\hat{b}_2}; \hat{a}_0 = -\frac{\hat{b}_1}{2\hat{b}_2}.$$

Следовательно, идентифицировав коэффициенты  $b_i$  регрессионной модели (4), можно определить текущие значения  $a_0(\xi)$  и  $a_1(\xi)$  для основного канала СИД. Подставляя их в исходное уравнение (1), получаем уточненную оценку входного сигнала:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\hat{a}_1(\xi)} [y_1(t) - \hat{a}_0(\xi)]. \tag{8}$$

Как следует из (2), данная процедура обеспечивает автоматическую коррекцию как аддитивной, так и мультипликативной составляющих погрешности.

Важным условием корректности идентификации является выбор интервала наблюдения  $T_n = t_N - t_1$ . Длительность интервала должна быть достаточной для накопления данных, но при этом гарантировать квазистационарность параметров  $a_0(\xi)$  и  $a_1(\xi)$  (их неизменность в течение цикла измерения). Точность оценивания  $\hat{b}_i$  и, как следствие,  $\hat{a}_0(\xi)$ ,  $\hat{a}_1(\xi)$  повышается с увеличением динамической вариабельности сигналов  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$ , что способствует снижению обусловленности ковариационной матрицы МНК-оценок.

**Архитектура интеллектуального датчика со структурной избыточностью**

Вычисленное по формуле (8) значение  $\hat{x}(t)$  представляет собой результат измерения с повышенной точностью. Оно может быть принято в качестве опорного (виртуального эталона) при реализации функций метрологического самоконтроля. Для сравнения: результат, полученный с использованием только номинальных коэффициентов без коррекции, выглядит следующим образом:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\hat{a}_1(\xi)} [y_1(t) - \hat{a}_0(\xi)].$$

Согласно [1], ИД обязан выполнять метрологический самоконтроль, то есть оценивать собственную метрологическую исправность и присваивать статус измерительной информации. Упрощенная структура такого минимально-избыточного ИД, функционирующего в условиях воздействия дестабилизирующих факторов  $\xi(t)$  и шумов  $\mu(t)$ , представлена на рисунке 2 [12].

В состав устройства входят: измерительные каналы (ИК), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) для хранения номинальных данных и вычислительное устройство (ВУ), реализующее алгоритмы идентификации и коррекции.

Необходимым условием состоятельности оценок  $\hat{a}_0(\xi)$  и  $\hat{a}_1(\xi)$  при априорно неизвестном входном сигнале  $x(t)$  является невырожденность информационной матрицы Фишера, формируемой при МНК-оценивании коэффициентов  $b_0, \dots, b_m$  модели (4).

В процессе самодиагностики вычислительное ядро ИД может вычислять и сравнивать с установленными допусками следующие диагностические признаки:

- абсолютную  $\Delta x$  или среднеквадратическую  $\sigma_x$  погрешности измерения;
- текущие значения дрейфа нуля  $\Delta a_0$  и чувствительности  $\Delta a_1$ ;
- величину остаточной погрешности расчета  $\hat{x}(t)$ .

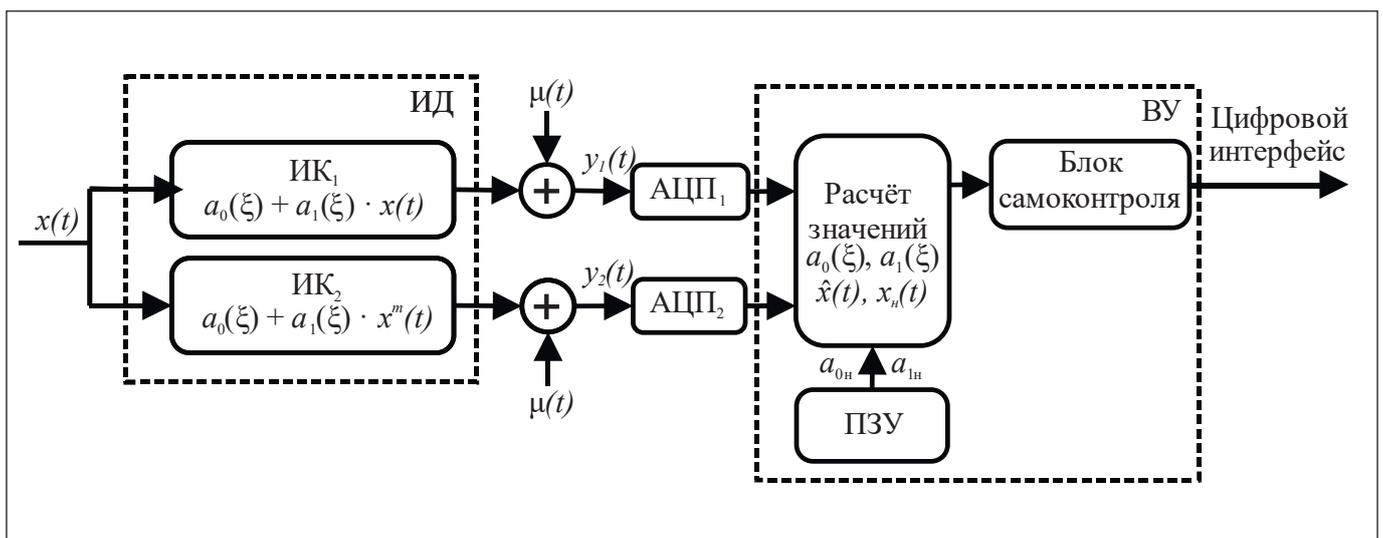


Рис. 2. Функциональная схема интеллектуального датчика с минимальной структурной избыточностью

На рис. 3 представлены результаты моделирования, отражающие зависимость приведенной среднеквадратической погрешности  $\gamma_x = \sigma_x / Lx$  оценки входного сигнала  $x(t)$ , где  $Lx$  — диапазон измерений сигнала  $x(t)$ , от уровня шума  $\gamma_{ш} = \sigma_{ш} / Lx$  и порядка нелинейности  $m$  в дополнительном канале. Для наглядности данные представлены в логарифмическом масштабе.

Анализ характеристик показывает, что форма и спектральный состав сигнала  $x(t)$  оказывают незначительное влияние на точность идентификации. Ключевым требованием является обеспечение относительного изменения сигнала  $\Delta / L \geq 0,01$  (1%) за время наблюдения  $T_{н}$ . Моделирование подтверждает, что оптимальной с точки зрения точности является степень нелинейности  $m = 2$ . При  $m > 2$  наблюдается ухудшение обусловленности информационной матрицы Фишера, что приводит к резкому росту погрешности оценивания, перекрывающему потенциальный выигрыш от увеличения асимметрии операторов основного и дополнительных каналов.

**Заключение**

Проведенный комплексный анализ убедительно демонстрирует, что ИД представляют собой не просто эволюционное развитие измерительной техники, а качественно новый подход к построению распределенных систем управления. Современные тенденции развития ИД указывают

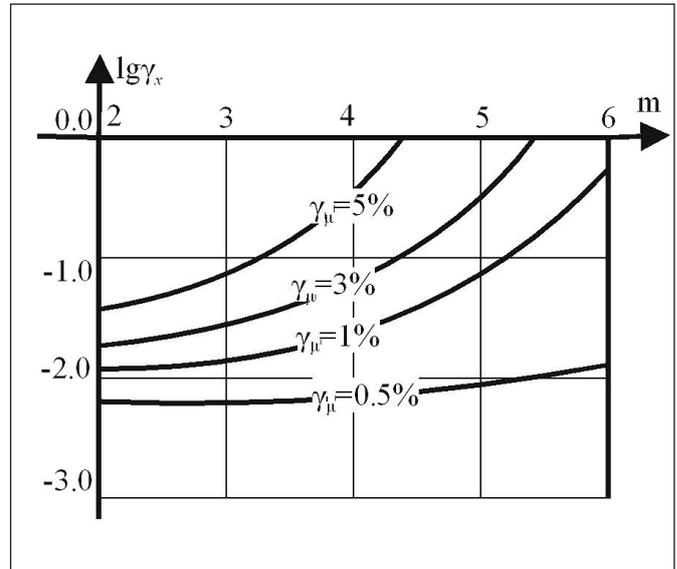


Рис. 3. Влияние уровня шума и порядка нелинейности ПФП на результирующую погрешность измерений

на их тесную интеграцию с технологиями искусственного интеллекта и системами на кристалле. В процессе трансформации ИД из простых измерительных устройств в активные узлы распределенных систем они становятся системообразующим фактором для современных и перспективных комплексов управления. Требования к ИД в ответственных применениях сводятся к трем основным принципам: безопасность отказа, устойчивость к ошибкам и несанкционированному доступу, максимальная самостоятельность в диагностике и устранении последствий сбоев.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- ГОСТ Р 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения = State system for ensuring the uniformity of measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 1098-ст; дата введения: 2010-12-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
- Белозубов Е. М., Васильев В. А., Чернов П. С. Метрологический самоконтроль интеллектуальных датчиков измерительных и управляющих систем // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 11–17.
- Телеметрия: учебник / А. И. Лоскутов [и др.]; под общ. ред. А. И. Лоскутова. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2017. 343 с.
- Элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля изделий ракетно-космической техники и объектов наземно-космической инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 2 (24). С. 5–13. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-2-1.

5. Минигалиев Г. Б., Долганов А. В. Выбор контроллера управления и интеллектуальные датчики: учебное пособие. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт, 2015. 136 с.
6. ГОСТ Р МЭК 60770-3-2016. Датчики для применения в системах управления промышленным процессом. Часть 3. Методы оценки характеристик интеллектуальных датчиков = Transmitters for use in industrial-process control systems. Part 3. Methods for performance evaluation of intelligent transmitters: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 июня 2016 г. № 466-ст: дата введения: 2017-04-01. М.: Стандартинформ, 2016. 58 с.
7. Васильев В. А., Чернов П. С. Интеллектуальные датчики, сети датчиков и цифровые интерфейсы // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 3–6.
8. IEC 61131-9:2022. Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022. 677 p.
9. ISO/IEC/IEEE 21450:2010. Information technology — Smart transducer interface for sensors and actuators — Common functions, communication protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats. Geneva: International Organization for Standardization, 2010. 325 p.
10. Беляев А. А., Волобуев П. С. Проектирование систем на кристалле с программируемой архитектурой: учебное пособие. М.: НИУ МИЭТ, 2018. 135 с.
11. Козырев Г. И., Юдицких Е. О., Усиков В. Д. Повышение точности телеметрических датчиков на основе использования принципа многоканальности // Вестник метролога. 2023. № 3. С. 15–23.
12. Синтез интеллектуальных датчиков на основе введения минимальной структурной избыточности / Г. И. Козырев [и др.] // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 22–27.

Дата поступления: 20.02.2026

Решение о публикации: 24.02.2026

## The Use of Intelligent Sensors in Space and Rocket Technology

**Anton A. Lobanov**<sup>1</sup>

— Cadet of the Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing. Research interests: measuring systems, artificial intelligence, improving the accuracy of telemetry. E-mail: tosha.lobanov03@mail.ru

**Gennady I. Kozyrev**<sup>1</sup>

— Dr. Sci. in Engineering, Full Professor, Professor of Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing. Research interests: measuring systems, artificial intelligence, improving the accuracy of telemetry. E-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

**Anatoly D. Khomonenko**<sup>1,2</sup>

— Dr. Sci. in Engineering, Full Professor, Professor of the Department of Mathematical and Software Engineering; Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modelling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

<sup>1</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russia, 197198

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, Russia, 190031

**For citation:** Lobanov A. A., Kozyrev G. I., Khomonenko A. D. The Use of Intelligent Sensors in Space and Rocket Technology, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 67–80. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-67-80

**Abstract.** *This paper presents a comprehensive analysis of the architecture, functional capabilities, and metrological properties of intelligent sensors, and proposes a method to enhance measurement accuracy. **Purpose:** to perform an in-depth analysis of intelligent sensors (IS) in relation to rocket and space technology (RST) products, and develop a detailed approach for improving measurement accuracy via the introduction of structural redundancy. **Methods:** a systematic analysis of IS architectures and functionalities was undertaken, together with formulation of a procedure for real-time identification of IS parameters during operation under unknown input signals. **Results:** it has been demonstrated that the integration of IS featuring self-adaptation and metrological self-monitoring fundamentally alters the architecture of distributed RST control systems. In addition, recommendations have been developed for selecting communication protocols appropriate to various RST subsystems. **Practical significance:** the establishment of criteria for the selection and design of IS, along with the introduction of a mathematical framework for creating IS with metrological self-monitoring function to enhance the autonomy, reliability, and measurement accuracy of RST products.*

**Keywords:** *measurement systems, artificial intelligence, self-diagnostics, intelligent processing, system on a chip, communication protocols, distributed control systems*

## REFERENCES

1. GOST R 8.673—2009. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektualnye i sistemy izmeritelnye intellektualnye. Osnovnye terminy i opredeleniya [GOST R 8.673—2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions]. Effective from December 01, 2010. Moscow, StandartInform Publishing House, 2019, 12 p. (In Russian)
2. Belozubov E. M., Vasilyev V. A., Chernov P. S. Metrologicheskiy samokontrol intellektualnykh datchikov izmeritelnykh i upravlyayushchikh sistem [Metrological Self-Checking of Smart Sensors of Measurement and Control Systems], *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2018, no. 7, pp. 11–17. (In Russian)
3. Loskutov A. I., et al. Telemetriya: uchebnik [Telemetry: a Textbook]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Aerospace Academy, 2017, 343 p. (In Russian)
4. Dmitrienko A. G., et al. Elementy kontseptsii postroeniya intellektualnykh sistem monitoringa i kontrolya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki i obektov nazemno-kosmicheskoy infrastruktury [Elements of Development Concept for Intelligent Monitoring and Control Systems in the Items of Rocket and Space Equipment and Objects of Ground-Based Space Infrastructure], *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol. [Measuring. Monitoring. Management. Control]*, 2018, no. 2 (24), pp. 5–13. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-2-1. (In Russian)
5. Minigaliev G. B., Dolganov A. V. Vybor kontrollera upravleniya i intellektualnye datchiki: uchebnoe posobie [Selecting a Management Controller and Intelligent Sensors: A Textbook]. Nizhnekamsk, Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute, 2015, 136 p. (In Russian)
6. GOST R MEK 60770-3—2016. Datchiki dlya primeneniya v sistemakh upravleniya promyshlennym protsessom. Chast 3. Metody otsenki kharakteristik intellektualnykh datchikov [GOST R MEK 60770-3—2016. Transmitters for use in industrial-process control systems. Part 3. Methods for performance evaluation of intelligent transmitters]. Effective from April 01, 2017. Moscow, StandartInform Publishing House, 2016, 58 p. (In Russian)
7. Vasilyev V. A., Chernov P. S. Intellektualnye datchiki, seti datchikov i tsifrovye interfeysy [Smart Sensors, Sensor Networks and Digital Interfaces], *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2012, no. 10, pp. 3–6. (In Russian)

8. IEC 61131-9:2022. Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI). Geneva, International Electrotechnical Commission, 2022, 677 p.
9. ISO/IEC/IEEE 21450:2010. Information technology — Smart transducer interface for sensors and actuators — Common functions, communication protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats. Geneva, International Organization for Standardization, 2010, 325 p.
10. Belyaev A.A., Volobuev P.S. Proektirovanie sistem na kristalle s programmiruemyy arkhitekturoy: uchebnoe posobie [Tutorial on Programmable Architecture System-on-a-Chip Design]. Moscow, National Research University of Electronic Technology, 2018, 135 p. (In Russian)
11. Kozyrev G.I., Yudickih E.O., Usikov V.D. Povyshenie tochnosti telemetricheskikh datchikov na osnove ispolzovaniya printsipa mnogokanalnosti [Increasing to Accuracy Telemetry Sensor on Base of the Use the Principle to Channelling], *Vestnik Metrologa*, 2023, no. 3, pp. 15–23. (In Russian)
12. Kozyrev G.I., et al. Sintez intellektualnykh datchikov na osnove vvedeniya minimalnoy strukturnoy izbytochnosti [Synthesis of Smart Sensors Based on the Introduction of Minimal Structural Redundancy], *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2020, no. 11, pp. 22–27. (In Russian)

Received: 20.02.2026

Accepted: 24.02.2026

УДК 004.048:550.8.053

## Пространственная интеграция данных между системами геомоделирования и геоинформационными системами: современные подходы и решения

- Гильванов Ринат Гаффанович** — канд. воен. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, виртуальная и дополненная реальность, иммерсивные технологии. E-mail: gilvanov1950@mail.ru
- 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
- Надеева Миля Ренатовна** — магистрант 2-го курса направления 09.04.02 «Информационные системы и технологии». Научные интересы: цифровая трансформация геологоразведки, интеграция данных систем геомоделирования и ГИС, семантическая интероперабельность геопространственных данных, машинное обучение в геологии, архитектура цифрового двойника месторождения. E-mail: milyanadeeva@yandex.ru

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

**Для цитирования:** Гильванов Р. Г., Забродин А. В., Надеева М. Р. Пространственная интеграция данных между системами геомоделирования и геоинформационными системами: современные подходы и решения // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 81–90. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-81-90

**Аннотация.** Рассматривается проблема пространственной интеграции данных между системами геомоделирования и геоинформационными системами — ключевая задача цифровой трансформации нефтегазовой отрасли. **Цель:** системный анализ существующих подходов к решению этой проблемы: использование стандартных форматов, программных интерфейсов и корпоративных платформ. **Результаты:** на основе сравнительного анализа и критической оценки специализированных инструментов выявлены их принципиальные ограничения: потеря семантики, зависимость от версий программного обеспечения, высокая стоимость внедрения, отсутствие поддержки двусторонней синхронизации и автоматического разрешения конфликтов данных. Показано, что для преодоления этих ограничений требуется разработка новой архитектуры интеграционных решений. **Практическая значимость:** полученные выводы могут быть полезны для проектирования более эффективных систем обмена геопространственной информацией, способных повысить качество геологической интерпретации, сократить сроки принятия решений и оптимизировать взаимодействие между подразделениями в нефтегазовой компании. **Обсуждение:** в качестве перспективных направлений развития предложены внедрение открытых стандартов OGC, применение методов машинного обучения для автоматизации преобразования данных, а также реализация концепции цифрового двойника месторождений.

**Ключевые слова:** геоинформационная система, пространственные данные, интеграция, обмен данными, геомоделирование, Petrel, архитектура плагинов, цифровой двойник месторождений, гибридное геомоделирование

**2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);  
**2.3.5** — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

## Введение

В условиях активной цифровой трансформации нефтегазовой отрасли все большее значение приобретает интеграция специализированных приложений для гео моделирования с современными геоинформационными системами (ГИС). Программные комплексы класса E&P, такие как Schlumberger Petrel [1], позволяют создавать детализированные трехмерные цифровые модели месторождений — от структурного моделирования и анализа фильтрационно-емкостных свойств до гидродинамических расчетов [2]. Между тем современные ГИС-платформы, включая ArcGIS и QGIS с отраслевыми модулями, обеспечивают широкий спектр возможностей — от пространственного анализа и тематической визуализации до обработки растровых и векторных данных и интеграции разнородных геоданных [3, 4].

## Проблематика интеграции пространственных данных

Несмотря на широкие возможности гео моделирующих комплексов и ГИС, их совместное использование связано с рядом серьезных трудностей. Наиболее значимыми проблемами являются:

- различия в форматах данных и связанные с этим сложности преобразования;
- ограничения по масштабируемости при работе с большими объемами геофизической информации;
- вопросы безопасности и контроля доступа к критически важным данным.

Преодоление этих ограничений позволяет существенно повысить эффективность работы с геопространственной информацией [5].

Автоматизация преобразования форматов данных и структур пространственных данных сокращает цикл их обработки, комплексный анализ в едином информационном пространстве повышает точность интерпретаций, а использование согласованных наборов данных укрепляет взаимодействие между геологическими, геофизическими и инженерными подразделениями.

Достижение перечисленных эффектов невозможно без использования современных методов

интеграции. Наибольшее значение здесь имеют открытые стандарты обмена данными, такие как платформа OSDU (Open Subsurface Data Universe), а также облачные технологии, которые обеспечивают хранение и обработку больших объемов информации. Важную роль играют ETL-процессы, позволяющие автоматизировать передачу данных между разнородными системами, и разработка специализированных API и пользовательских коннекторов, расширяющих возможности взаимодействия. Перспективным направлением становится применение методов искусственного интеллекта, которые помогают сопоставлять данные по смыслу и повышать качество их интеграции [6].

Статья посвящена изучению современных методов и технологий, применяемых для решения обозначенных проблем. При этом особое внимание уделяется практическому аспекту — оценке применимости интеграционных решений в реальных проектах нефтегазовой отрасли.

## Методология интеграции пространственных данных

В современной практике интеграции систем гео моделирования и геоинформационных технологий выделяют три основных подхода, каждый из которых имеет свои особенности реализации и ограничения.

### *Обмен данными через промежуточные форматы*

Один из наиболее распространенных способов интеграции основан на использовании стандартизированных форматов обмена. К ним относятся:

- GRDECL/ASCII — для передачи дискретных грид-моделей;
- GeoTIFF — для описания растровых геологических поверхностей;
- Shape-файл/GeoJSON — для представления векторных объектов инфраструктуры.

Преимущества такого подхода очевидны: он обеспечивает совместимость с широким спектром программных платформ, относительно прост в реализации и не требует значительных вычислительных ресурсов.

Однако использование стандартизованных форматов обмена имеет и ряд ограничений:

1. Потеря метаданных. При сериализации данных часть служебной информации (атрибутов, связей, описаний) часто теряется, что снижает качество последующей интерпретации.

2. Ручной контроль целостности. Проверка корректности и полноты преобразованных данных в большинстве случаев выполняется вручную, что замедляет процесс и повышает риск ошибок.

3. Ограниченная поддержка структур. Промежуточные форматы не рассчитаны на хранение сложных геологических моделей, например неструктурированных сеток, что существенно ограничивает их применение в практических задачах.

Данный метод можно рассматривать как эффективное решение для базового обмена пространственными данными и взаимодействия разнородных систем. Однако функциональные ограничения не позволяют в полной мере использовать его при интеграции сложных геологических моделей и многоуровневых структур, что становится критичным при интеграции детализированных геологических моделей. Именно эти недостатки обусловили развитие альтернативных подходов, основанных на использовании специализированных SDK и программных интерфейсов.

### **Специализированные SDK и программные интерфейсы**

Более продвинутый подход к интеграции основан на использовании специализированных SDK и программных интерфейсов. К таким инструментам относятся:

- API Petrel Ocean — обеспечивает доступ к ядру систем геомоделирования;
- ArcPy/GDAL — для автоматизации процессов в среде ГИС;
- REST API — для облачной интеграции.

Практический эффект данного подхода демонстрирует опыт компании «Газпром нефть», где автоматизация обновления картографического материала с применением API Petrel Ocean и ArcPy позволила сократить время подготовки документации более чем на 80%.

Преимущества данного подхода:

1. Высокая точность. Обеспечивается минимальная потеря информации при передаче данных.
2. Гибкость. Возможность реализации сложных преобразований и адаптации под конкретные задачи.

3. Поддержка потоковой обработки. Актуально для сценариев с большими объемами информации.

Ограничения подхода:

1. Требуются специализированные навыки программирования и знание архитектуры систем.
2. Обновления платформ могут нарушать совместимость разработанных решений.

Несмотря на указанные ограничения, использование SDK и API обеспечивает более глубокую интеграцию по сравнению со стандартизованными форматами обмена и позволяет реализовывать более сложные сценарии обработки данных. Однако высокая сложность внедрения и зависимость от инфраструктуры делают данный метод оправданным прежде всего в крупных проектах с высокими требованиями к автоматизации и точности [7].

### **Корпоративные системы управления данными**

Наиболее комплексным методом интеграции являются корпоративные платформы управления данными, которые обеспечивают централизованное хранение, обработку и синхронизацию пространственной информации.

Промышленными решениями являются:

- платформа FME — универсальная система преобразования данных [3];
- Petrosys PRO — программное обеспечение для картографирования, моделирования и анализа данных;
- платформа данных OSDU — открытая облачная платформа для работы с геологическими и производственными данными.

Практика применения корпоративных систем демонстрирует их высокую эффективность. Так, в компании Shell внедрение ежедневной синхронизации данных на базе сервера FME позволило повысить точность информации на 32%, сократить время согласования между подразделениями и обеспечить прозрачность процессов конверсии данных.

Преимущества подхода:

1. Возможность реализации интеграции на уровне корпоративных сценариев.

2. Автоматическая проверка корректности и целостности данных при обмене.

3. Адаптация решений к росту объемов информации и числа пользователей.

Ограничения подхода:

1. Высокая стоимость внедрения, значительные капитальные затраты на приобретение лицензии и сопровождение.

2. Необходимость в развитой ИТ-инфраструктуре и поддержке высококвалифицированных специалистов.

Корпоративные системы управления данными, несомненно, предоставляют наиболее полный функционал для интеграции геодезирования и ГИС, объединяя поддержку сложных процессов, валидацию и масштабируемость. Однако высокая стоимость и требования к инфраструктуре ограничивают их применение в небольших проектах, делая данный подход оправданным преимущественно для крупных компаний и долгосрочных проектов (инициатив).

Рассмотренные подходы к интеграции пространственных данных демонстрируют различный уровень глубины и сложности реализации. Стандартизированные форматы удобны и универсальны, но ограничены при работе со сложными моделями. SDK и API обеспечивают точность и гибкость, однако требуют высокой квалификации и зависят от стабильности версий программного обеспечения. Корпоративные платформы предоставляют наиболее широкий функционал, включая масштабируемость и встроенную валидацию, но связаны с высокими затратами и инфраструктурными ограничениями [8].

Таким образом, выбор методологии определяется как техническими требованиями проекта, так и ресурсными возможностями организации.

### Критическая оценка существующих решений

Представленные выше методологические подходы описывают общие принципы интеграции

пространственных данных. На практике они реализуются через специализированные программные инструменты, которые обеспечивают взаимодействие геодезирующих комплексов и ГИС. При этом эффективность таких инструментов зависит не только от заложенных возможностей, но и от существующих ограничений. Ниже приведены наиболее показательные примеры.

Специализированными инструментами интеграции являются:

#### 1. Blueback Spatial Image Connector (Blueback Reservoir)

Предлагает подключение к сервисам веб-картографии. Его достоинство — простота и удобство интеграции. Однако функциональность ограничивается статичными изображениями, что не позволяет эффективно работать с динамическими данными.

#### 2. GIS Data Link (GeoCap)

Предназначен для экспорта трехмерных моделей в среду ГИС. Данное решение позволяет упростить обмен пространственной информацией, но при работе с большими массивами данных возникают проблемы производительности, требующие дополнительной оптимизации [9].

#### 3. Petrosys PRO

Предоставляет профессиональные инструменты визуализации и подготовки документации. Система демонстрирует высокую производительность и востребована в корпоративной среде. В то же время она ориентирована преимущественно на специализированные задачи и не может рассматриваться как универсальное средство интеграции.

Перечисленные решения демонстрируют реальную практическую ценность и активно применяются в отрасли. Однако их специализация и ограниченность функционала не позволяют рассматривать данные решения как комплексные инструменты пространственной интеграции. Это подчеркивает необходимость разработки более универсальных инструментов, которые сочетали бы гибкость, масштабируемость и способность работать со сложными структурами данных [10, 11].

Сравнение инструментов интеграции представлено в табл. 1.

## Сравнение специализированных инструментов интеграции

Инструмент	Назначение	Преимущества	Ограничения	Типичная область применения
Blueback Spatial Image Connector	Подключение к веб-картам (статические изображения)	Простота; удобство	Только статические данные, без динамики	Быстрая интеграция картографических слоев
GeoCap GIS Data Link	Экспорт 3D-моделей в ГИС	Упрощает обмен моделями	Проблемы производительности при больших данных	Передача 3D-моделей в среду ГИС
Petrosys PRO	Визуализация; картография; документация	Высокая производительность; корпоративная востребованность	Специализация; не универсальное решение	Подготовка отчетности, карт, презентаций
FME (Safe Software)	ETL-инструмент; преобразование форматов	Поддержка сотен форматов; автоматизация	Лицензионная стоимость; требует настройки	Массовая конверсия и синхронизация данных
OSDU Data Platform	Облачная платформа для геоданных	Открытые стандарты; масштабируемость	Высокие требования к инфраструктуре	Единое корпоративное хранилище данных

### Сравнительный анализ методологических подходов к интеграции пространственных данных

Сравнение существующих методов интеграции позволяет систематизировать наиболее важные особенности различных подходов к интеграции, демонстрируя их основные преимущества и основные недостатки.

#### 1. Экспорт данных в стандартные форматы (Direct)

Подход отличается простотой и гибкостью, не требует специальных программных средств и подходит для разовых преобразований (например, конвертации ASCII в SHP).

Вместе с тем его ограничения очевидны:

- необходимость ручной настройки параметров преобразования для каждого типа данных;
- отсутствие механизмов автоматической проверки результатов конверсии;
- дискретный характер обмена, который не способствует работе в режиме реального времени.

#### 2. Интеграции с использованием специализированных плагинов

Преимущества метода:

- высокий уровень автоматизации обменных процессов;

- сохранение семантики данных за счет использования собственных форматов;
- возможность настройки параметров преобразования.

Вместе с тем данный подход не лишен недостатков:

- строгое соблюдение архитектурных ограничений, предлагаемых API;
- подверженность проблеме несовместимости версий при обновлении платформ;
- ограниченная поддержка пользовательских типов данных.

#### 3. Отсутствие универсальных решений

Анализ рынка программного обеспечения показывает отсутствие комплексных решений, способных предложить:

- непрерывную передачу данных;
- двустороннюю синхронизацию в реальном времени;
- автоматическое разрешение конфликтов версий.

Современные коммерческие продукты (Petrel-GIS Connector, FME) имеют лишь частичную реализацию предъявляемых требований.

#### 4. Проблема преобразований координат

По данным исследования Wood Mackenzie (2023), в 78% случаев интеграции возникает

необходимость конвертации координат между различными системами — от локальных до глобальных (WGS-84, PZ-90) и специализированных (например, координаты устья/забоя скважины).

Это влечет совокупные риски:

- потерю точности при работе с детализированными моделями;
- расхождения в определении опорных картографических реперов.

### 5. Дополнительные технологические ограничения

Помимо указанных проблем, интеграция осложняется рядом фундаментальных различий в архитектуре используемых систем:

- Модели данных. Геоинформационные системы традиционно опираются на реляционную парадигму, в то время как многие геомоделирующие комплексы используют объектно-ориентированные модели, что затрудняет сопоставление структур и требует дополнительных преобразований [11].

- Системы контроля версий. В ГИС применяются собственные механизмы управления изменениями, несовместимые с инструментами, используемыми в геомоделировании. В результате возникают сложности при согласовании совместной работы.

- Пространственное индексирование. Различия в подходах к пространственному индексированию (например, R-деревья, квадродеревья и их модификации) приводят к снижению производительности при интеграции больших наборов данных и ограничивают возможности оптимизации запросов.

Результаты сравнительного анализа демонстрируют: существующие методы решают лишь частные задачи интеграции, оставляя нерешенными ключевые проблемы совместимости, масштабируемости и автоматизации.

В связи с этим перспективными направлениями развития можно считать:

- разработку унифицированных онтологий предметной области, обеспечивающих единое понимание и сопоставимость данных;

- создание адаптивных механизмов преобразования координат, позволяющих минимизировать ошибки при работе с различными системами;

- реализацию конвейеров непрерывного обмена данными, ориентированных на двустороннюю синхронизацию в реальном времени;

- внедрение интеллектуальных систем валидации, автоматизирующих контроль качества пространственной информации.

Одним из перспективных направлений является применение технологий семантических сетей и машинного обучения, которые открывают возможности для разработки самонастраивающихся интеграционных систем [12].

В табл. 2 представлено сравнение уже существующих инструментальных подходов к интеграции пространственных данных.

### Перспективы развития систем пространственной интеграции

Анализ современного состояния технологий геомоделирования и интеграции ГИС позволяет выделить несколько стратегически значимых направлений их развития:

#### 1. Архитектура, основанная на открытых стандартах

Наиболее перспективным подходом является создание модульных расширений, опирающихся на международные стандарты OGC (WMS 3.0, WFS 3.0, WPS), современные форматы хранения (GeoPackage, COG) и протоколы обмена (OGC API — Features, OGC API — Processes).

#### 2. Кросс-платформенные технологии

Широкие возможности открывают библиотеки Python (NumPy, GeoPandas, PyProj), инструменты пространственной обработки данных (GDAL 3.6+, PDAL) [13], а также контейнеризация с использованием Docker и Kubernetes, позволяющая разрабатывать переносимые и масштабируемые приложения.

#### 3. Функциональные компоненты

Перспективные решения должны включать унифицированный интерфейс для отображения семантических атрибутов, модуль преобразования координат с поддержкой динамических систем

## Сравнение инструментальных подходов к интеграции пространственных данных

Подход	Примеры	Преимущества	Ограничения	Область применения
Стандартизированные форматы (Direct)	GRDECL, GeoTIFF, GeoJSON	Простота и универсальность; не требует сложных навыков; совместимость со многими системами	Потеря метаданных; ручная проверка целостности; ограниченная поддержка сложных структур	Разовый обмен; базовые конверсии
SDK и API	Petrel Ocean API, ArcPy, GDAL, REST API	Высокая точность; гибкость; поддержка потоковой обработки	Требуются навыки программирования; возможные проблемы совместимости при обновлениях	Крупные проекты с высокими требованиями к автоматизации
Корпоративные платформы управления данными	FME, Petrosys PRO, OSDU	Масштабируемость; автоматическая проверка целостности; интеграция на уровне предприятия	Высокая стоимость; требования к ИТ-инфраструктуре	Долгосрочные проекты в крупных компаниях

и пользовательских трансформаций, а также многоуровневую систему журналирования и управления версиями данных.

#### 4. Передовые технологии

Особый интерес представляют векторизованные пространственные операции, механизмы постепенной синхронизации изменений и применение методов машинного обучения для автоматической классификации атрибутов, оптимизации конверсий и прогнозирования конфликтов данных.

#### 5. Архитектурные принципы

Развитие интеграционных решений тесно связано с внедрением микросервисной архитектуры, принципов достоверности данных и концепции цифрового двойника, что обеспечивает масштабируемость и воспроизводимость процессов.

Теоретическая ценность перспективных решений заключается в формировании целостной методологии пространственной интеграции, а ее практическая значимость — в уменьшении технологических разрывов между системами, повышении точности геопро пространственного анализа и оптимизации процессов принятия решений.

Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на формализации требований к системам нового поколения и разработке соответствующих эталонных архитектур, способных обеспечить устойчивую интеграцию в условиях постоянно растущих объемов данных.

#### Заключение

Проведенный анализ современных подходов к интеграции систем гео моделирования и ГИС свидетельствует о том, что существующие методы — обмен через стандартизированные форматы, применение SDK/API и внедрение корпоративных платформ — обладают принципиальными ограничениями, не позволяющими в полной мере обеспечить семантическую целостность, масштабируемость и оперативность обмена пространственными данными [11].

Выявленные различия в архитектуре, моделях данных и механизмах контроля версий между гео моделирующими комплексами и геоинформационными системами обуславливают невозможность создания единой универсальной платформы, одинаково эффективно решающей все задачи интеграции.

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что дальнейшее развитие интеграционных решений должно осуществляться в русле смены парадигмы: отказ от попыток создания монолитных универсальных платформ в пользу формирования адаптивной экосистемы специализированных парных интерфейсов и коннекторов, функционирующих на базе открытых стандартов (OGC, OSDU) и микросервисной архитектуры.

Предлагаемый подход, в отличие от унифицированных решений, характеризуется следующими принципиальными возможностями:

- сохранить вычислительную специализацию и функциональную автономность каждой из интегрируемых систем;

- обеспечить онтологическую совместимость данных за счет унифицированных протоколов обмена, учитывающих семантику предметной области;

- реализовать двустороннюю синхронизацию в реальном времени и автоматическое разрешение конфликтов версий;

- интегрировать интеллектуальные механизмы валидации и алгоритмы машинного обучения для повышения качества и достоверности передаваемой информации.

Таким образом, разработка стандартизированных, но адаптируемых интерфейсов взаимодей-

ствия представляет собой наиболее перспективное направление, отвечающее современным требованиям цифровой трансформации нефтегазовой отрасли. Предложенный подход создает методологическую основу для формирования целостной информационной среды геологоразведки и разработки месторождений, открывая возможности для практической реализации концепции цифровых двойников и обеспечения устойчивой интеграции в условиях растущих объемов и сложности геопространственных данных. В более широком контексте предложенные подходы могут быть применены и в других сферах, где требуется работа с большими объемами пространственной информации — от экологии до градостроительства [14].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Программная платформа Petrel // Официальный сайт компании «Шлюмберже». URL: <http://digital.slb.ru/products/petrel/> (дата обращения: 29.09.2025).
2. Шутов Д. А., Соилов Б. С. Применение цифровых двойников в геологии / науч. рук. Ю. Г. Смирнов // Севергеозотех-2022: материалы XXIII Международной молодежной научной конференции (Ухта, Россия, 16–18 марта 2022 года). Ухта: Ухтинский гос. технический ун-т, 2022. С. 229–232.
3. FME Workbench essentials // ArcGIS Pro. URL: <http://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/data-interoperability/fme-workbench-essentials.htm> (дата обращения: 29.09.2025).
4. QGIS Documentation. URL: <http://docs.qgis.org/3.40/en/docs/index.html> (дата обращения: 29.09.2025).
5. Кондратьев А. А. Цифровая трансформация в нефтегазовой сфере // Вестник науки. 2023. № 11 (68). Т. 2. С. 804–821.
6. Марков Н. Г. Геоинформационные системы предприятий нефтегазовой отрасли: функциональность, архитектура и перспективы развития // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 9. С. 16–32.
7. Зайнуллин Р. И., Гузаиров М. Б. Новые подходы к хранению и обработке больших массивов геоданных // Инновации и инвестиции. 2014. № 12. С. 164–166.
8. Скворцов А. В. Геоинформатика: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2006. 336 с.
9. Мое А. DataLink for ArcGIS // Atlassian Confluence. 2015. 20 October. URL: <http://geocap.atlassian.net/wiki/spaces/ug/pages/22053150> (дата обращения: 29.09.2025).
10. OGC API — Features — Part 1: Core corrigendum. Version 1.0.1 / С. Portele [et al.] (eds). Open Geospatial Consortium, 2022. URL: <http://www.opengis.net/doc/IS/ogcapi-features-1/1.0.1> (дата обращения: 29.09.2025).
11. ДеМерс М. Н. Географические информационные системы. Основы / пер. с англ. В. Андрианова. М.: Дата+, 1999. 502 с.
12. Технологии семантического веба для поддержки фундаментальных исследований в геологии / И. В. Бычков [и др.] // Электронные библиотеки. 2025. Т. 28, № 4. С. 740–780. DOI: 10.26907/1562-5419-2025-28-4-740-780.
13. GDAL Documentation. URL: <http://gdal.org/en/stable/index.html> (дата обращения: 29.09.2025).
14. Иванов А. Г., Крылов С. А., Дворников А. В. Современные средства и методы обучения по курсу «Геоинформационное картографирование» // Приложение к журналу «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка»: сборник статей по итогам научно-технической конференций. 2009. № 2–1. С. 178–182.

Дата поступления: 19.01.2026

Решение о публикации: 25.02.2026

# Spatial Data Integration in Geomodelling and Geoinformation Systems: Contemporary Approaches and Solutions

- Rinat G. Gilvanov** — PhD in Military Sciences, Associate Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, virtual and augmented reality, immersive technologies. E-mail: gilvanov1950@mail.ru
- 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
- Milya R. Nadeeva** — 2nd year Master's Degree Student in 09.04.02 Information Systems and Technologies. Research interests: digital transformation of geological exploration, data integration of geomodelling and GIS systems, semantic interoperability of geospatial data, machine learning in geology, architecture of the digital twin of the deposit. E-mail: milyanadeeva@yandex.ru

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

**For citation:** Gilvanov R. G., Zabrodin A. V., Nadeeva M. R. Spatial Data Integration in Geomodelling and Geoinformation Systems: Contemporary Approaches and Solutions, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 81–90. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-81-90. (In Russian)

**Abstract.** *This paper addresses the integration of spatial data inside geomodelling and geoinformation systems, a pivotal task in the digital transformation of the oil and gas sector. **Purpose:** a systematic analysis of current approaches to solving this issue, including the use of standard formats, software interfaces, and corporate platforms. **Results:** a comparative analysis and critical evaluation of specialist tools have revealed principal limitations, such as semantic information loss, reliance on specific software versions, high implementation costs, and inadequate support for bidirectional synchronization and automated conflict resolution. These findings indicate the necessity for a revised integration architecture to mitigate these deficiencies. **Practical significance:** the findings offer guidance for developing more efficient geospatial-information exchange mechanisms that can enhance the quality of geological interpretation, shorten decision-making cycles, and optimize interdepartmental collaboration within oil and gas industry. **Discussion:** promising areas of development include adopting open OGC standards, applying machine-learning techniques to automate data conversion, and implementing digital-twin concepts of deposits.*

**Keywords:** *geographic information system, spatial data, integration, data exchange, geomodelling, Petrel, plugin architecture, digital twin of deposits, hybrid geomodelling*

## REFERENCES

1. Programmnyaya platforma Petrel [Petrel Software Platform], *Schlumberger's official website*. Available at: <http://digital.slb.ru/products/petrel/> (accessed: September 29, 2025). (In Russian)
2. Shutov D.A., Soibov B.S. Primenenie tsifrovyykh dvoynikov v geologii [The Use of Digital Twins in Geology], *Severgeokotekh–2022: materialy XXIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii [Severgeokotekh-2022: Proceedings of the XXIII International Scientific Youth Conference]*, Ukhta, Russia, March 16–18, 2022. Ukhta, Ukhta State Technical University, 2022, pp. 229–232. (In Russian)
3. FME Workbench essentials, *ArcGIS Pro*. Available at: <http://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/data-interoperability/fme-workbench-essentials.htm> (accessed: September 29, 2025).
4. QGIS Documentation. Available at: <http://docs.qgis.org/3.40/en/docs/index.html> (accessed: September 29, 2025).

5. Kondratiev A.A. Tsifrovaya transformatsiya v neftegazovoy sfere [Digital Transformation in the Oil and Gas Sector], *Vestnik Nauki*, 2023, no. 11 (68), vol. 2, pp. 804–821. (In Russian)
6. Markov N.G. Geoinformatsionnye sistemy predpriyatiy neftegazovoy otrasli: funktsionalnost, arkhitektura i perspektivy razvitiya [Geoinformation Systems for Oil and Gas Enterprises: Functionality, Architecture and Development Prospects], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 16–32. (In Russian)
7. Zaynullin R.I., Guzairov M.B. Novye podkhody k khraneniyu i obrabotke bolshikh massivov geodannykh [New Approach to Storing and Processing of Geodata Warehouse], *Innovacii i Investicii*, 2014, no. 12, pp. 164–166. (In Russian)
8. Skvortsov A.V. Geoinformatika: uchebnoe posobie [Geoinformatics: A Textbook]. Tomsk, Tomsk State University Publishing House, 2006, 336 p. (In Russian)
9. Moe A. DataLink for ArcGIS, *Atlassian Confluence*. Published online at October 20, 2015. Available at: <http://geocap.atlassian.net/wiki/spaces/ug/pages/22053150> (accessed: September 29, 2025).
10. Portele C., et al. (eds) OGC API — Features — Part 1: Core corrigendum. Version 1.0.1. Open Geospatial Consortium, 2022. Available at: <http://www.opengis.net/doc/IS/ogcapi-features-1/1.0.1> (accessed: September 29, 2025).
11. DeMers M.N. Geograficheskie informatsionnye sistemy. Osnovy [Fundamentals of Geographic Information Systems]. Moscow, Data+ Publishing House, 1999, 502 p. (In Russian)
12. Cherkashin E.A., et al. Tekhnologii semanticheskogo veba dlya podderzhki fundamentalnykh issledovaniy v geologii [Semantic Web Technologies for Supporting Fundamental Research in Geology], *Elektronnye biblioteki [Russian Digital Libraries Journal]*, 2025, vol. 28, no. 4, pp. 740–780. DOI: 10.26907/1562-5419-2025-28-4-740-780. (In Russian)
13. GDAL Documentation. Available at: <http://gdal.org/en/stable/index.html> (accessed: September 29, 2025).
14. Ivanov A.G., Krylov S.A., Dvornikov A.V. Sovremennyye sredstva i metody obucheniya po kursu “Geoinformatsionnoe kartografirovaniye” [Contemporary Resources and Instructional Strategies for the “Geoinformation Mapping” Course], *Prilozhenie k zhurnalu “Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka”: sbornik statey po itogam nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 2009, no. 2–1, pp. 178–182. (In Russian)

Received: 19.01.2026

Accepted: 25.02.2026

## Смагин Владимир Александрович

17 июля 1935 — 30 декабря 2025

Сотрудники кафедры «Информационные и вычислительные системы» ПГУПС, кафедр информационно-вычислительных систем, программного и математического обеспечения ВКА им. А.Ф. Можайского с глубоким прискорбием сообщают, что 30 декабря 2025 года на 91-м году жизни после непродолжительной болезни скончался наш коллега, известный российский ученый, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик Международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского **Владимир Александрович Смагин** (17.07.1935 — 30.12.2025).

В.А. Смагин родился 17 июля 1935 года в селе Каргополье Курганской области. В 1964-м он окончил Ленинградскую Краснознаменную военно-воздушную инженерную академию имени А.Ф. Можайского, с которой впоследствии оказалась связана вся его жизнь. В 1967 году защитил кандидатскую диссертацию. Полковник (1979). Доктор технических наук (1983). Профессор (1987). Академик Международной академии информатизации (1994). Пройдя путь от старшего научного сотрудника НИЛ-7 до начальника кафедры, профессор Смагин внес неоценимый вклад в развитие отечественной вычислительной техники и обеспечение надежности ракетно-космической техники. С 1979 по 1994 год он возглавлял кафедру электронной вычислительной техники, а с 1994-го продолжал трудиться профессором кафедры метрологического обеспечения.

Основное направление научной деятельности Владимира Александровича было связано с анализом и обеспечением надежности вычислительных средств и программного обеспечения систем космической техники. Он является создателем обобщенной теории восстановления сложных систем, автором фундаментальных трудов по аппроксимационным методам исследования случайных процессов. Одним из новых

направлений исследований профессора В.А. Смагина стала теория информационной борьбы. Его исследования нашли практическое применение в разработках ведущих предприятий космической отрасли, включая КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Владимир Александрович — автор более 350 научных и методических трудов, в том числе 2 монографий и 50 учебников и учебных пособий для высшей школы, обладатель 13 авторских свидетельств на изобретения. Под его руководством и при его научном консультировании подготовлены 23 кандидата и 3 доктора наук. Многие годы он руководил работой Всесоюзного отраслевого научно-технического семинара «Проблемные вопросы эксплуатации вычислительных средств вооружения и их программного обеспечения» (1987–1994), воспитывая научные кадры для оборонной промышленности.

Заслуги профессора Смагина отмечены высокими наградами: орденом Красной Звезды (1987), 14 медалями, знаками отличия «Высшая школа» (1988) и Федерации космонавтики (1986). В 2001 году ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», а в 2005 году — звание почетного профессора академии.

Светлая память о Владимире Александровиче Смагине — талантливом ученом, педагоге и офицере — навсегда сохранится в сердцах его коллег, учеников и всех, кто имел честь работать с ним.

*Сотрудники ФГБОУ ВО ПГУПС,  
ВКА им. А.Ф. Можайского,  
коллектив редакции журнала  
«Интеллектуальные технологии на транспорте»*



## SMAGIN Vladimir Aleksandrovich

17.07.1935 – 30.12.2025

The staff of the Department of Information and Computing Systems of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), and the departments of Information and Computing Systems, Software and Mathematical Support of the Mozhaisky Military Space Academy, with deep sorrow announce that on December 30, 2025, at the age of 90, after a brief illness, passed away our colleague, a renowned Russian scientist, Honored Scientist of the Russian Federation, Academician of the International Academy of Informatization, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Mozhaisky Military Space Academy Vladimir Aleksandrovich Smagin (17.07.1935 — 30.12.2025).

V.A. Smagin was born on July 17, 1935, in the village of Kargopolye, Kurgan Region. In 1964, he graduated from the Leningrad Red Banner Air Force Engineering Academy named after A.F. Mozhaisky, with which his entire life would subsequently be connected. In 1967, he defended his Candidate of Sciences dissertation. He attained the rank of Colonel (1979). He became a Doctor of Technical Sciences (1983) and a Professor (1987). He was elected an Academician of the International Academy of Informatization (1994). Progressing from Senior Research Fellow of Scientific Research Laboratory-7 to Department Head, Professor Smagin made an invaluable contribution to the development of national computer technology and ensuring the reliability of rocket and space technology. From 1979 to 1994, he headed the Department of Electronic Computing Technology, and from 1994 onwards, he continued his work as a Professor at the Department of Metrological Support.

The main direction of Vladimir Aleksandrovich's scientific activity was related to the analysis and assurance of reliability of computing facilities and software for space technology systems. He is the creator of the generalized theory of recov-

ery for complex systems and the author of fundamental works on approximation methods for studying stochastic processes. One of the new research directions pursued by Professor V.A. Smagin was the theory of information warfare. His research found practical application in the developments of leading enterprises in the space industry, including the Salyut Design Bureau of the Khrunichev State Research and Production Space Center.

Vladimir Aleksandrovich is the author of over 350 scientific and educational publications, including 2 monographs and 50 textbooks for university students, and is the holder of 13 patents for inventions. Under his leadership and with his scientific advice, 23 candidates and 3 doctors of sciences have been trained. For many years, he led the All-Union industry scientific and technical seminar “Problematic Issues in the Operation of Weapons Computing Facilities and Their Software” (1987–1994), training scientific personnel for the defense industry.

The merits of Professor Smagin have been recognized with high awards: the Order of the Red Star (1987), 14 medals, badges of distinction “Higher School” (1988) and the Federation of Cosmonautics (1986). In 2001, he was awarded the honorary title “Honored Scientist of the Russian Federation”, and in 2005, the title of Professor Emeritus of the Academy.

The blessed memory of Vladimir Aleksandrovich Smagin — a talented scientist, educator, and officer — will forever remain in the hearts of his colleagues, students, and all who had the honor of working with him.

*Employees Emperor Alexander I  
St. Petersburg State Transport University,  
Mozhaisky Military Aerospace Academy,  
the editorial staff of the journal  
“Intelligent Technologies on Transport”*