ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

2026
Т.26, № 1

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

Редакционная коллегия:
Логиновский О.В., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*гл. редактор*) (г. Челябинск);
Мельников А.В., д.т.н., проф. (*зам. гл. редактора*) (г. Ханты-Мансийск);
Голлай А.В., д.т.н., доц. (*зам. гл. редактора*) (г. Челябинск);
Захаров В.В., *отв. секретарь* (г. Челябинск);
Баркалов С.А., д.т.н., проф. (г. Воронеж);
Березанский Л., PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);
Болодурина И.П., д.т.н., проф. (г. Оренбург);
Джапаров Б.А., д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);
Дранко О.И., д.т.н., доц. (г. Москва);
Ефанов В.Н., д.т.н., проф. (г. Уфа);
Затонский А.В., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Максимов А.А., д.т.н. (г. Новокузнецк);
Прангишвили А.И., д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);
Щепкин А.В., д.т.н., проф. (г. Москва);
Ячиков И.М., д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

Редакционный совет:
Шестаков А.Л., д.т.н., проф. (*председатель*) (г. Челябинск);
Браверман Е., PhD, проф. (г. Калгари, Канада);
Дегтярь В.Г., д.т.н., проф., академик РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);
Казаринов Л.С., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Кибалов Е.Б., д.э.н., проф. (г. Новосибирск);
Лясковская Е.А., д.э.н., доц. (г. Челябинск);
Новиков Д.А., д.т.н., проф., академик РАН (г. Москва);
Панферов В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Слинько А., PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);
Столбов В.Ю., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Ушаков В.Н., д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);
Шестаков И., д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);
Ширяев В.И., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Шнайдер Д.А., д.т.н., доц. (г. Челябинск);
Штессель Ю., PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2026

BULLETIN

OF THE SOUTH URAL STATE UNIVERSITY

SERIES

"COMPUTER TECHNOLOGIES, AUTOMATIC CONTROL, RADIO ELECTRONICS"

2026

Vol. 26, no. 1

ISSN 1991-976X (Print)
ISSN 2409-6571 (Online)

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya "Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika"

South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

Editorial Board:

Loginosvkiy O.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Melnikov A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*deputy editor-in-chief*), Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;
Hollay A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Zakharov V.V., *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Barkalov S.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;
Berezansnky L., PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;
Bolodurina I.P., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation;
Dzhaparov B.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;
Dranko O.I., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
Efanov V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;
Zatonskiy A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;
Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation, Novokuznetsk, Russian Federation;
Prangishvili A.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;
Shchepkin A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
Yachikov I.M., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

Editorial Council:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Braverman E., PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;
Degtyar' V.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;
Kazarinov L.S., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Kibalov E.B., Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;
Lyaskovskaya E.A., Dr. of Sci. (Econ.), Ass. Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Novikov D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
Panferov V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Slinko A., PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;
Stolbov V.Yu., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;
Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;
Shestakov I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;
Shiryaev V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Schneider D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
Shtessel Yu., PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

БАРКАЛОВ С.А., АВЕРИНА Т.А., ПЕЛИХОВА А.С. Инновационные цифровые решения в строительстве: обоснование выбора цифровой платформы 5

СОКОЛКОВ О.И. Повышение точности распознавания просек для эффективного спутникового мониторинга незаконных вырубок леса 21

Управление в технических системах

ЯЧИКОВ И.М., ШАТАЛОВ Е.А. Анализ методов расчета температурного поля металлической пластины при ее поверхностной лазерной закалке 33

ШЕСТАКОВ А.Л., ЦИОПЛИАКИС Н.И. Консистентные инвариантные математические модели для визуально-инерциальной навигационной системы с блочным комплексирующим фильтром 43

ЛЫСОВ С.С., ДУДАРЕВ Н.В. Влияние взаимного расположения приемников ГНСС на точность определения углового положения летательного аппарата на этапе посадки 61

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

КАЗАНЦЕВ Д.Ю., ПИЛИПЕНКО А.С., ОСЕЕВ Ю.В. Автоматизированный контроль параметров операционных усилителей при исследовании эффекта низкой интенсивности 72

Управление в социально-экономических системах

ДРАНКО О.И., БЕЛОВА А.С. Подход по ценообразованию на олигополистическом рынке с использованием индекса Лернера 80

БАРКАЛОВ С.А., БЕЛОУСОВ А.В., СЕРЕБРЯКОВА Е.А. Разработка стратегий управления сложными проектами на основе алгоритмов обучения с подкреплением 90

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., БРАЖЕНКО С.А. Модель и методы информационного обеспечения автоматизации процессов управления и принятия решений в торгово-производственных предприятиях 102

Краткие сообщения

БОГАТЕНКОВ С.А., ГЕЛЬРУД Я.Д., БОГАТЕНКОВ Д.С., КЕТОВА И.А. Методология подготовки ИТ-кадров для работы в среде 1С 115

CONTENTS

Informatics and computer engineering

BARKALOV S.A., AVERINA T.A., PELIKHOVA A.S. Innovative digital solutions in construction: Rationale for choosing a digital platform 5

SOKOLKOV O.I. Improving the detection accuracy of linear clear-cuts for effective satellite monitoring of illegal forest felling 21

Control in technical systems

YACHIKOV I.M., SHATALOV E.A. Analysis of temperature field calculation methods for a metal plate during surface laser hardening 33

SHESTAKOV A.L., TSIOPLIAKIS N.I. Consistent invariant mathematical models for a visual-inertial navigation system with a block fusion filter 43

LYSOV S.S., DUDAREV N.V. The effect of the relative position of the GNSS receivers on the accuracy of determining the angular position of the aircraft at the landing stage 61

Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

KAZANTSEV D.Yu., PILIPENKO A.S., OSEEV Yu.V. Operational amplifier parameters automated control in the enhanced low dose rate sensitivity effect investigation 72

Control in social and economic systems

DRANKO O.I., BELOVA A.S. An approach to pricing in an oligopolistic market using the Lerner index 80

BARKALOV S.A., BELOUSOV A.V., SEREBRYAKOVA E.A. Development of strategy of management of the difficult projects on the basis of tutoring algorithms with the reinforcement ... 90

LOGINOVSKIY O.V., BRAZHENKO S.A. Model and methods of information support for automating management and decision-making processes in trade-and-production enterprises 102

Brief reports

BOGATENKOV S.A., GELRUD Ya.D., BOGATENKOV D.S., KETOVA I.A. Methodology for training IT staff to work in the 1C environment 115

Информатика и вычислительная техника
Informatics and computer engineering

Научная статья
УДК 658.51
DOI: 10.14529/ctcr260101

ИННОВАЦИОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ РЕШЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ

***С.А. Баркалов**, sbarkalov@nm.ru, https://orcid.org/0000-0001-6183-3004*
***Т.А. Аверина**, ta_averina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9150-9018*
***А.С. Пелихова**, anastasiapelihova004@gmail.com*
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В статье обозначена роль инновационного менеджмента в развитии строительных организаций сегодня. Отмечена его интеграционная функция и стратегическая значимость. Проведен анализ современных цифровых технологий, применяемых в строительных проектах: BIM, роботизация, 3D-печать, модульное строительство, цифровые двойники и IoT. На основе метода анализа иерархий определено наиболее предпочтительное цифровое решение (цифровая платформа) для российских строительных компаний. **Материалы и методы.** Проведён анализ научной литературы и практических кейсов по использованию цифровых технологий в строительстве. Систематизированы ключевые инновации в строительстве по процессам жизненного цикла проекта. С помощью метода анализа иерархий (МАИ) выбран лучший вариант цифровой платформы среди шести альтернатив с учётом критериев эффективности, интеграции и нормативного соответствия. **Целью** исследования является комплексный анализ современного состояния инновационного развития строительной отрасли, выявление ключевых проблем и перспективных направлений их решения, а также обоснование целесообразности внедрения инновационных управленческих практик. Особое внимание уделяется выбору наиболее эффективного варианта организационных инноваций – цифровой платформы управления жизненным циклом строительного проекта. **Результаты.** Выявлены основные факторы снижения эффективности строительных проектов – несогласованность документации и ошибки коммуникации, составляющие до 70–80 % всех потерь. Установлено, что цифровизация и внедрение единой среды данных позволяют существенно снизить количество ошибок и ускорить проектирование. По результатам МАИ лучшей признана связка Renga + Pilot-BIM, обеспечивающая соответствие российским требованиям и повышение производительности. **Заключение.** Цифровые технологии доказали высокую результативность в повышении качества проектирования и снижении рисков строительства. При этом важно грамотное управление системой инновационных решений. Применение отечественных платформ Renga и Pilot-BIM является наиболее эффективным и экономически оправданным решением для российских компаний, обеспечивая технологическую независимость и повышение уровня управляемости проектов.

Ключевые слова: инновация, цифровизация, строительный проект, цифровая платформа, жизненный цикл проекта

Для цитирования: Баркалов С.А., Аверина Т.А., Пелихова А.С. Инновационные цифровые решения в строительстве: обоснование выбора цифровой платформы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 5–20. DOI: 10.14529/ctcr260101

© Баркалов С.А., Аверина Т.А., Пелихова А.С., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260101

INNOVATIVE DIGITAL SOLUTIONS IN CONSTRUCTION: RATIONALE FOR CHOOSING A DIGITAL PLATFORM

***S.A. Barkalov**, sbarkalov@nm.ru, https://orcid.org/0000-0001-6183-3004*
***T.A. Averina**, ta_averina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9150-9018*
***A.S. Pelikhova**, anastasiapelihova004@gmail.com*
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The study is devoted to the analysis of modern digital technologies used in construction projects and the selection of the optimal platform for managing the life cycle of the facility. BIM, robotization, 3D printing, modular construction, digital twins and IoT are considered. **Materials and methods.** An analysis of scientific literature and practical cases on the use of digital technologies in construction was carried out. Key innovations were systematized: BIM, robotics, 3D printing, UAV monitoring, digital twins, IoT. The hierarchy analysis method (MAI) was applied to select the optimal digital platform among six alternatives, taking into account the criteria of efficiency, integration and regulatory compliance. **The research objective** is a comprehensive analysis of the current state of innovative development of the construction industry, the identification of key problems and promising areas for their solution, as well as the justification of the feasibility of introducing innovative management practices. Particular attention is paid to the choice of the most effective option for organizational innovations – a digital platform for managing the life cycle of a construction project. **Results.** The main factors for reducing the efficiency of construction projects are identified – inconsistency of documentation and communication errors, which account for up to 70–80 % of all losses. It has been established that digitalization and the introduction of a unified data environment can significantly reduce the number of errors and speed up design. **Conclusion.** Digital technologies have proven to be highly effective in improving the quality of design and reducing construction risks. The use of domestic Renga and Pilot-BIM platforms is the most effective and cost-effective solution for Russian companies, ensuring technological independence and improving project manageability.

Keywords: innovation, digitalization, construction projects, digital platform, project life cycle

For citation: Barkalov S.A., Averina T.A., Pelikhova A.S. Innovative digital solutions in construction: Rationale for choosing a digital platform. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):5–20. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260101

Введение

В современных экономических условиях инновационный менеджмент становится одним из ключевых факторов устойчивого развития строительных предприятий. Рост числа технологических новшеств, цифровизация проектных и производственных процессов, переход к энергоэффективному и «умному» строительству формируют принципиально новые требования к организации управления.

Если ещё десять лет назад инновации рассматривались преимущественно как вариативная часть стратегии строительной компании, то сегодня они становятся ядром конкурентоспособности. В условиях высокой конкуренции, дефицита квалифицированных кадров и необходимости повышения производительности труда именно способность эффективно управлять инновациями обеспечивает предприятию устойчивое положение на рынке.

Инновационный менеджмент можно определить как систему методов и инструментов, направленных на формирование, внедрение и коммерциализацию нововведений, обеспечивающих долгосрочное повышение эффективности организации.

В строительной сфере это включает не только технологические инновации – BIM-технологии, префабрикации или «умных» материалы, – но и управленческие и организационные новшества: новые формы проектного управления, цифровой документооборот, гибридные формы взаимодействия участников проекта, цифровые платформы.

Роль инновационного менеджмента в строительной компании заключается прежде всего в систематизации инновационной деятельности, превращении её из набора разрозненных инициа-

тив в управляемый процесс. Это особенно важно в российских условиях, где многие предприятия испытывают трудности с планированием инвестиций в инновации, нехваткой кадров и нормативными барьерами.

Как подчёркивается в исследовании ДОМ.РФ [1], доля строительных организаций, использующих цифровые технологии на уровне производственных процессов, остаётся сравнительно небольшой – не более 20 %, а применение BIM в проектировании достигает лишь 8–10 % предприятий. Это говорит о том, что потенциал инновационного менеджмента в строительстве реализован далеко не полностью.

Отметим, что инновационный менеджмент в строительной отрасли России выполняет роль системообразующего механизма, обеспечивающего технологическое и организационное обновление предприятий. Он объединяет стратегическое планирование, проектное управление, кадровое развитие и финансовую устойчивость. Успех в этой области зависит не только от готовности компании внедрять новые технологии, но и от способности выстраивать эффективные связи между инновационной стратегией и общей бизнес-моделью.

Наиболее успешными примерами применения инновационного менеджмента можно считать деятельность компаний, которые интегрировали инновации во все уровни управления. Так, корпорация ПИК внедрила комплексную систему BIM-моделирования и CDE-платформу для управления данными на всех стадиях жизненного цикла, что позволило сократить срок выхода проекта на стадию строительства, а также существенно уменьшить потери материалов [2]. Группа Apis Cor, напротив, демонстрирует инновационный подход в технологическом плане – разработку и коммерциализацию 3D-печати домов [3], что открывает перспективы для малоэтажного домостроения и реконструкции в удалённых регионах. Эти примеры показывают, что инновационный менеджмент может принимать разные формы, но в каждом случае требует стратегического видения, организационной поддержки и готовности к эксперименту.

Цель работы заключается в анализе текущей ситуации в области инновационного развития в строительной отрасли, выявлении проблем и перспективных решений, обосновании необходимости внедрения инновационных управленческих практик и выборе лучшего варианта организационных инноваций – цифровой платформы управления жизненным циклом строительного проекта.

Материалы и методы

В последние годы строительная отрасль претерпевает масштабные изменения под влиянием цифровых технологий, автоматизации и индустриализации процессов. Исследования демонстрируют, что ключевыми драйверами трансформации стали Building Information Modeling (BIM), роботизация, 3D-печать строительных материалов, модульное домостроение, цифровые двойники и технологии Интернета вещей (IoT). Современные тенденции характеризуются стремлением к повышению точности проектирования, снижению себестоимости и сокращению сроков строительства за счёт интеграции данных и автоматизации процессов.

Согласно исследованиям применение BIM-технологий позволяет системно оптимизировать управление проектной информацией, что снижает количество проектных коллизий и повышает качество координации между участниками строительства.

Особое внимание в научной литературе уделяется автоматизации и роботизации строительных процессов. В работе T. Bock представлены направления развития строительной робототехники, включая автоматизированную кладку, роботизированную сварку, автономные машины и цифровые технологии контроля качества. Автор подчёркивает, что роботизация способна не только повысить точность операций, но и снизить трудозатраты на ключевых этапах строительства [4]. Кроме того, согласно выводам исследования Robotics in the Construction Industry: A Bibliometric Review of Recent Trends and Technological Evolution [5] внедрение роботизированных технологий рассматривается как важнейший путь повышения производительности, борьбы с дефицитом квалифицированных кадров и повышения безопасности на стройплощадках; отмечен устойчивый рост исследований в этой области, что свидетельствует об усилении интереса и потенциальной практической значимости роботизации.

Отдельный блок исследований посвящён технологиям 3D-печати бетона. В систематических обзорах G.H. Ahmed и F. Bos рассматриваются материалы, формирование конструктивных эле-

ментов, а также ограничения и перспективы внедрения. Авторы подчёркивают, что 3D-печать позволяет уменьшить отходы, ускорить строительство и снизить стоимость малых архитектурных форм и отдельных конструктивных элементов [6, 7].

Не менее значимый вклад в трансформацию отрасли вносит модульное и индустриальное строительство. В исследовании M. Zohourian и A. Pamidimukkala показано, что фабричная подготовка модулей обеспечивает сокращение сроков строительства на 30–50 %, повышает точность изготовления и снижает риски, связанные с человеческим фактором [8]. При этом авторы отмечают, что мировая практика показывает устойчивый рост спроса на off-site технологии, особенно в коммерческом и жилищном строительстве.

Важным направлением развития стала интеграция беспилотных летательных аппаратов (UAV) и технологий мониторинга. A.A. Molina, Y. Huang, Y. Jiang демонстрируют, что использование дронов позволяет значительно улучшить качество контроля строительных площадок, повысить точность геодезической съёмки и уменьшить время, необходимое для инспекций объектов [9]. Подобные подходы особенно важны для крупных строек, где пространственный контроль и своевременная оценка рисков являются критическими.

Цифровые двойники и IoT формируют основу следующего этапа цифровизации строительства. E. Opoku и W. Liu отмечают, что цифровые двойники позволяют создавать динамические модели зданий для мониторинга, прогнозирования и оптимизации эксплуатационных характеристик на протяжении всего жизненного цикла объекта [10]. Исследования M. Jia, посвящённые IoT и смарт-зданиям, подтверждают, что интеграция сенсоров, систем аналитики и средств автоматизации повышает энергоэффективность зданий и улучшает управление инженерными системами [11].

Таким образом, современная строительная отрасль движется в направлении индустриализации, цифровой интеграции и автоматизации процессов. Исследования показывают, что внедрение BIM, роботизации, 3D-печати, модульного строительства, UAV, цифровых двойников и IoT приводит к заметному росту эффективности, снижению рисков и сокращению затрат. Однако, несмотря на значительный прогресс, сохраняются барьеры – недостаточная квалификация персонала, фрагментация нормативной базы и ограниченный уровень внедрения инноваций в ряде регионов. Это подтверждает необходимость дальнейшего развития цифровых компетенций и создания адаптивных моделей управления в строительной отрасли.

Проблемы и перспективы развития технологических инноваций в строительной отрасли России

Рассмотрим динамику роста доли инновационно-активных предприятий в строительной отрасли России (рис. 1).

Современный этап развития строительной отрасли России характеризуется форсированным переходом от «аналоговых» процессов к цифровым экосистемам. Согласно данным федерального статистического наблюдения и мониторинга НИУ ВШЭ «Индикаторы инновационной деятельности» [12], доля предприятий строительной отрасли, осуществляющих технологические инновации, демонстрирует стабильный восходящий тренд.

Если в 2020–2021 гг. активность сдерживалась неопределенностью пандемийного периода и составляла около 7,5–9 %, то к началу 2025 г., на фоне реализации нацпроекта «Жилье и городская среда» и обязательного внедрения ТИМ (технологий информационного моделирования), показатель вовлеченности в инновации достиг 18,4 %.

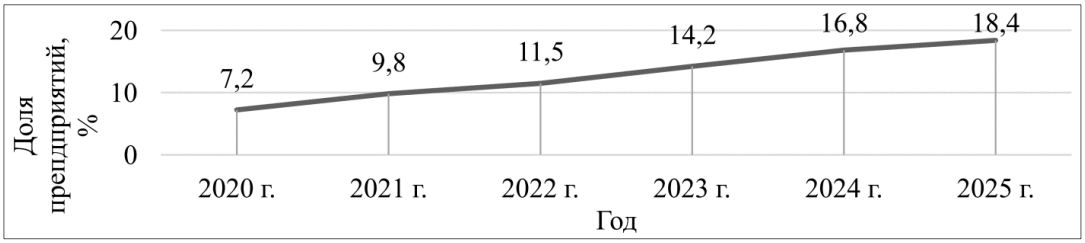


Рис. 1. Рост доли инновационно-активных предприятий строительной отрасли России, %
Fig. 1. Growth in the share of innovation-active enterprises of the construction industry in Russia, %

Среднегодовой темп прироста инновационной активности в строительстве за последние 5 лет составил порядка 15,2 %. Это значительно выше среднерыночных показателей по сектору услуг и ряду отраслей добывающей промышленности. Столь высокая динамика объясняется «эффектом низкой базы» прошлых лет и жестким регуляторным давлением со стороны Минстроя России в части цифровизации проектной документации. Рост инновационной активности напрямую связан с несколькими факторами:

- государственная политика стимулирования инноваций – реализация национальных проектов «Цифровая экономика РФ» и «Жильё и городская среда», а также введение обязательных требований по применению BIM/ТИМ-технологий в государственных контрактах с 2022 г.;
- развитие цифровой инфраструктуры – переход на использование облачных решений, систем управления строительными процессами и цифровых паспортов зданий;
- расширение рынка отечественного ПО и импортозамещение – рост доли российских BIM-платформ и IoT-систем после 2022 г.;
- сдвиг в корпоративной культуре – повышение внимания к инновационным компетенциям персонала, созданию R&D-отделов и центров цифровой трансформации в крупных строительных холдингах.

Таким образом, наблюдается устойчивая положительная динамика инновационной активности строительных предприятий России. При сохранении текущих темпов роста к 2025 г. доля инновационно-активных компаний может превысить 17 %, что позволит отрасли перейти на новый уровень технологической зрелости.

Несмотря на положительную динамику, внедрение технологических инноваций в российских строительных предприятиях сталкивается с рядом системных ограничений (барьеров), которые отражены на рис. 2.

Рис. 2. Системные ограничения, влияющие на внедрение технологических инноваций
Fig. 2. System constraints affecting the implementation of technological innovations

Рассмотрим данные группы барьеров:

- финансовый барьер: капитальные затраты на внедрение BIM, IoT, роботизации и префабрикации остаются высокими. Для большинства компаний среднего размера окупаемость таких проектов превышает 5–7 лет, что делает инновации экономически рискованными без внешней поддержки;
- организационный и кадровый дефицит**:** отсутствует достаточное число BIM-координаторов, инженеров по цифровым двойникам, специалистов по обработке данных и управлению жизненным циклом. Это приводит к несогласованности процессов и снижает эффективность внедрения;
- технологические и нормативные барьеры: несовместимость программных решений (разные форматы IFC, DWG, RVT), отсутствие единого хранилища данных (CDE), а также пробелы в стандартах по 3D-печати и модульному строительству;
- внешние факторы – санкции и импортозависимость программного обеспечения и оборудования – создают риски для технологической независимости и тормозят адаптацию инноваций;
- институциональный разрыв между крупными корпорациями и малым бизнесом: крупные девелоперы активно внедряют BIM и цифровые платформы, тогда как малые предприятия часто остаются вне инновационного контура. Это усиливает отраслевую поляризацию и препятствует масштабной цифровизации сектора.

Перспективы развития технологических инноваций в строительстве России остаются высокими и многопрофильными. Согласно отчётам IMARC Group, ожидается, что до 2030 г. доля проектов с применением BIM-технологий вырастет более чем в 2,5 раза, а доля цифровых инструментов управления строительством – до 60 %.

К числу приоритетных векторов технологического развития относятся следующие направления:

• комплексное внедрение технологий информационного моделирования зданий (BIM) на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства – от стадии концептуального проектирования до эксплуатации и вывода из использования;

• расширение практики префабрикации и модульного строительства, обеспечивающей существенное сокращение сроков возведения объектов (в среднем на 30–40 %) и оптимизацию трудовых ресурсов;

• активное развитие и адаптация аддитивных технологий (3D-печати), применяемых при строительстве малоэтажных жилых зданий, а также отдельных элементов инженерной и транспортной инфраструктуры;

• внедрение цифровых двойников в сочетании с системами мониторинга на основе интернета вещей (IoT) с целью повышения эксплуатационной надежности, энергоэффективности и управляемости зданий;

• применение экологически безопасных строительных материалов и интеллектуальных инженерных решений, включая фасадные системы с интегрированными солнечными панелями и высокоэффективные композитные материалы.

По прогнозам экспертов, внедрение таких решений к 2030 г. позволит отрасли сократить издержки на проектирование и строительство до 20–25 %, а эксплуатационные затраты – на 10–15 %.

Отметим, что современные строительные проекты используют широкий спектр цифровых технологий, однако каждая из них работает на определённых стадиях жизненного цикла и решает строго локальные задачи.

В соответствии с методологией PMBOK управление строительным проектом проходит через пять ключевых групп процессов: инициация, планирование, реализация, мониторинг и контроль, завершение. Каждая группа процессов включает разные типы активности и формирует собственный набор требований к данным, коммуникациям и управленческим решениям.

Систематизируем рассмотренные выше технологии для наглядного отображения того, какие инновационные инструменты наиболее эффективно поддерживают каждую стадию жизненного цикла строительного проекта. Такое представление данных позволяет не только структурировать инновационный контур проекта, но и выявить разрывы между этапами, которые неизбежно возникают при использовании несвязанных инструментов, даёт возможность увидеть, где уровень цифровизации уже достаточно высок, а где сохраняются информационные разрывы, создающие необходимость внедрения комплексных решений, таких как цифровые платформы.

Структурирование инновационных технологий по этапам жизненного цикла строительного проекта подтверждает ключевую проблему: цифровые решения активно развиваются, но действуют разрозненно, будучи привязанными к отдельным группам процессов. В частности:

• UAV и IoT – сильнее всего влияют на процессы исполнения и контроля;

• BIM – поддерживает почти все группы процессов, но особенно проектирование и планирование;

• цифровые двойники – особо важны на стадиях контроля и передачи проекта;

• CDE – единственный компонент, который теоретически может связать процессы в единый контур, но только при комплексном внедрении.

Несмотря на наличие современных технологий, реализация стадий жизненного цикла строительного проекта часто происходит с большими потерями. Это приводит:

• к дублированию информации;

• ошибкам из-за отсутствия актуальной версии данных;

• неэффективному взаимодействию участников;

• ограниченной прозрачности реализации проекта.

Таким образом, табл. 1 наглядно демонстрирует необходимость внедрения комплексных организационных инноваций, таких как единые цифровые платформы (BIM/CDE), способные объединить процессы всех стадий жизненного цикла строительного проекта. Только в этом случае инновации переходят от точечных технологических улучшений к системному повышению качества управления строительными проектами.

Таблица 1

Инновационные технологии по стадиям жизненного цикла строительного проекта

Table 1

Innovative technologies by stages of the life cycle of a construction project

Стадия жизненного цикла строительного проекта	Технологии	Функциональная роль
Инициация	• Big Data; • ГИС-системы; • Предварительное BIM-моделирование	Анализ участка и ограничений, прогноз рисков, первичный расчёт стоимости и сроков, оценка технической и экономической целесообразности проекта, моделирование сценариев реализации
Планирование	• BIM 3D/4D/5D; • CDE; • Big Data; • Модульное проектирование	Формирование календарно-сетевого графика, моделирование зависимости «срок – стоимость», ресурсоёмкость, подготовка технического задания, создание структуры проекта, планирование модульных решений и логистики
Реализация	• BIM 4D; • Модульное строительство; • Роботизация; • UAV; • 3D-печать; • IoT стройплощадки	Реализация проектных решений, выполнение СМР, контроль фактических объёмов, автоматизация операций, снижение трудоёмкости, получение полевых данных в реальном времени
Мониторинг и контроль	• UAV-мониторинг; • IoT; • Машинное зрение; • Цифровые двойники; • Аналитика (AI/ML)	Контроль отклонений по срокам и стоимости, оперативное выявление коллизий и дефектов, оценка качества, мониторинг состояния конструкций, сравнение BIM-модели и фактических данных
Завершение	• CDE; • Лазерное сканирование; • Цифровой паспорт проекта; • BIM 7D	Формирование исполнительной документации, проверка соответствия проекту, окончательная передача BIM-модели заказчику/эксплуатирующей организации, закрытие контрактов и подведение итогов

В современных условиях инновационный менеджмент становится центральным управленческим инструментом, обеспечивающим баланс между технологическими инновациями, экономической целесообразностью и стратегией развития предприятия.

Во-первых, инновационный менеджмент позволяет систематизировать инновационную деятельность – от анализа трендов до оценки рисков и возврата инвестиций. Он обеспечивает портфельное управление инновационными проектами, где каждое направление (BIM, IoT, 3D-печать) оценивается с точки зрения стратегической значимости и окупаемости.

Во-вторых, инновационный менеджмент способствует созданию корпоративной культуры инноваций, включая обучение персонала, обмен знаниями и мотивацию сотрудников к использованию новых инструментов.

В-третьих, в контексте строительной отрасли инновационный менеджмент обеспечивает:

- оптимизацию процессов проектирования и строительства;
- сокращение ошибок и переделок;
- улучшение взаимодействия между участниками проекта (заказчик – проектировщик – подрядчик – эксплуатирующая организация);
- повышение прозрачности управления затратами и сроками.

Компании, которые внедряют инновационные практики под управлением компетентных инновационных менеджеров, демонстрируют устойчивое повышение эффективности. Согласно

оценке PwC Russia [13], такие компании сокращают сроки реализации проектов в среднем на 25 % и уменьшают совокупные затраты на 15–20 %.

Таким образом, инновационный менеджмент формирует интеллектуальный контур развития предприятия, объединяя технологические, организационные и экономические инновации в единую стратегию роста.

Разработка предложения по цифровизации жизненного цикла строительного проекта

Современная строительная отрасль переживает масштабную цифровую трансформацию. Одним из ключевых направлений этого процесса является переход к цифровым платформам управления жизненным циклом строительного проекта (Building Lifecycle Platforms, BIM/CDE-системы), обеспечивающим интеграцию данных и участников на всех стадиях реализации проекта – от проектирования до эксплуатации.

В большинстве российских строительных компаний цифровизация процессов ограничивается использованием отдельных инструментов – AutoCAD, Excel, локальных ERP-систем. Отсутствие единой цифровой среды (Common Data Environment, CDE) приводит к потере информации между стадиями проектирования, строительства и эксплуатации, а также к увеличению сроков и затрат. По данным McKinsey & Company (2023) [14], до 80 % задержек на строительных объектах вызвано несогласованностью данных и слабой интеграцией участников проекта. При этом внедрение BIM-платформ и систем цифрового управления жизненным циклом позволяет сокращать сроки реализации проектов на 25–30 % и снижать стоимость на 15–20 %.

Современные исследования подтверждают, что комплексная цифровизация жизненного цикла объекта (от проектирования до эксплуатации) предоставляет строительным компаниям значительные конкурентные преимущества. Так, в исследовании [15] отмечено, что применение BIM на всех этапах жизненного цикла позволяет улучшить сотрудничество, принятие решений на основе данных и экономию времени и средств. Кроме того, интеграция BIM с методами оценки жизненного цикла (LCA) приводит к снижению выбросов CO_2 на 53–75 % и снижению энергопотребления более чем на 30 % на примере кейса в Китае [16].

Цифровая платформа – это программно-информационный комплекс, объединяющий участников проекта (заказчика, проектировщика, подрядчика, поставщиков и эксплуатирующую организацию) в едином цифровом пространстве.

Её ключевая цель – обеспечить прозрачность, синхронность и управляемость всех процессов в рамках единой информационной модели здания (BIM-модели).

Основные функции цифровой платформы:

- создание и хранение информационной модели объекта (3D–7D BIM);
- автоматизация документооборота и согласований;
- контроль сроков, стоимости и качества работ;
- интеграция с ERP и финансовыми системами (например, 1С);
- использование цифровых паспортов зданий и IoT-датчиков для мониторинга в эксплуатации;
- обеспечение соответствия государственным требованиям и стандартам проектирования.

Таким образом, платформа выступает «цифровым ядром» предприятия, объединяющим производственные, инженерные, финансовые и аналитические процессы в единую систему управления активом.

Платформа реализует принципы BIM и CDE (Common Data Environment), обеспечивая единую цифровую модель объекта, доступную всем участникам проекта в реальном времени.

Так, типовая архитектура платформы включает несколько функциональных модулей, отраженных в табл. 2 [17].

Технически такие платформы работают на основе облачной архитектуры, обеспечивая доступ через веб-интерфейс, контроль версий и безопасность данных с помощью ролевого доступа, шифрования и цифровой подписи.

CDE, который был упомянут ранее, – ключевой элемент платформы, обеспечивающий совместную работу всех участников строительного проекта. Все данные, чертежи и модели хранятся централизованно, а изменения фиксируются с указанием времени и автора. Таким образом, проектировщик, инженер, сметчик и заказчик работают с одной актуальной версией данных, что резко снижает количество ошибок и ускоряет согласование решений.

Например, архитектор обновляет модель здания – система автоматически уведомляет инженеров и сметчиков о внесённых изменениях. Это исключает конфликт версий и повышает точность проектной документации.

Таблица 2

Архитектура цифровой платформы

Table 2

Digital platform architecture

Модуль	Назначение	Примеры
BIM-моделирование (3D–7D)	Создание и анализ цифровой модели объекта, включая стоимость, график, эксплуатационные параметры	Renga, Revit, ArchiCAD
CDE (общее пространство данных)	Централизованное хранение, версия и согласование проектной документации	Pilot-BIM, Autodesk Docs
Управление проектами	Контроль задач, сроков, ресурсов, ответственности	Pilot-BIM Project, PlanRadar
Аналитика и визуализация	Формирование отчетов, мониторинг KPI, оценка рисков	Power BI, Pilot-Analytics
Интеграция с ERP/CRM	Синхронизация финансов, снабжения и заказов	1C, SAP, Oracle Primavera
IoT и эксплуатация	Подключение датчиков, предиктивный анализ и обслуживание объектов	Siemens MindSphere, EcoStruxure

На сегодняшний день как в России, так и в мире используется ряд ЦП, различающихся по степени интеграции и специализации, отразим их в табл. 3.

Таблица 3

ЦП управления жизненным циклом строительного проекта

Table 3

Construction Project Lifecycle Management CPU

Платформа	Разработчик	Тип	Особенности
Autodesk Construction Cloud (ACC)	Autodesk (США)	Облачная	Полный цикл: проектирование, строительство, эксплуатация
Trimble Connect	Trimble (США)	CDE	Коллаборация в 3D, совместная работа в облаке
BIM 360	Autodesk (США)	Облачная	Поддержка IFC, управление моделями и проектами
Renga + Pilot-BIM	АСКОН и Pilot-Инжиниринг (Россия)	Облачная/локальная	Отечественное решение, интеграция с 1C, поддержка ГОСТ
BIM Cloud (СберТех)	Сбербанк (Россия)	Облачная	Национальная CDE-платформа для госзаказов
PlanRadar	Австрия	Мобильная	Управление дефектами, отчётность с площадки

По прогнозу IMARC Group (2025), доля строительных проектов в России, реализуемых с применением BIM и цифровых платформ, вырастет к 2030 г. более чем в 2,5 раза, а уровень цифровизации предприятий достигнет 60 % [18]. Ведущие компании (ГК ПИК, А101, Самолёт, Apis Cor) уже демонстрируют интеграцию BIM, IoT и аналитики в единую экосистему управления проектами.

Таким образом, цифровые платформы становятся стратегическим инструментом управления и обеспечивают переход отрасли от бумажного документооборота к интеллектуальной модели управления активами.

Выбор оптимального варианта ЦП управления жизненным циклом строительного проекта

Определим наиболее предпочтительный вариант ЦП управления жизненным циклом строительного проекта, который будет удовлетворять следующим критериям:

$К_1$ – соответствие российским стандартам и нормативной базе;

$К_2$ – отечественная разработка и независимость от зарубежного ПО;

$К_3$ – технологическая совместимость;

$К_4$ – экономическая эффективность;

$К_5$ – простота обучения и локализация интерфейсов;

$К_6$ – интеграция с ERP и аналитикой.

Далее перейдем к непосредственному выбору наиболее предпочтительной ЦП управления жизненным циклом строительного проекта, который будет осуществлен при помощи метода анализа иерархий (МАИ) в среде MS Excel [19].

В данном случае имеются шесть альтернатив (шесть вариантов ЦП управления жизненным циклом строительного проекта), которые обозначим $А_1$, $А_2$, $А_3$, $А_4$, $А_5$, $А_6$, где $А_1$ – Autodesk Construction Cloud (ACC), $А_2$ – Trimble Connect, $А_3$ – BIM 360, $А_4$ – Renga + Pilot-BIM, $А_5$ – BIM Cloud (СберТех), $А_6$ – PlanRadar. Кроме того, имеются шесть критериев выбора альтернатив, обозначенные $К_1$, $К_2$, $К_3$, $К_4$, $К_5$, $К_6$ (сущность данных критериев была описана ранее).

На начальном этапе исследования осуществляется последовательное попарное сопоставление четырёх рассматриваемых альтернатив по первому критерию $К_1$. Результатом данной процедуры является формирование матрицы предпочтений $V^{(1)} = [u_{ij}]$, элементы которой определяются в зависимости от сравнительной оценки альтернатив. В случае если альтернатива $А_i$ по степени предпочтительности не уступает альтернативе $А_j$, элемент матрицы принимает значение $u_{ij} = h$, где параметр h отражает интенсивность предпочтения. Если же альтернатива $А_i$ оценивается ниже альтернативы $А_j$ по данному критерию, соответствующий элемент матрицы определяется как обратная величина $u_{ij} = 1/h$.

По аналогичному алгоритму формируются матрицы попарных сравнений для остальных критериев оценки, обозначаемые $V_{ij}^{(k)}$, где $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Совокупность полученных матриц имеет вид: $V_{ij}^{(1)}$, $V_{ij}^{(2)}$, $V_{ij}^{(3)}$, $V_{ij}^{(4)}$, $V_{ij}^{(5)}$, $V_{ij}^{(6)}$.

Следует отметить, что процедура сопоставления альтернатив основывается на шкале сравнительной значимости, приведённой в табл. 4. При этом исходные данные табл. 3 использовались в качестве базиса для определения величины коэффициента предпочтения h.

Таблица 4

Шкала относительной важности альтернатив

Table 4

Relative Importance Scale of Alternatives

Уровень важности	Степень предпочтительности h
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное превосходство	5
Значительно большее превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

На следующем этапе проводится попарное сравнение самих критериев, по результатам которого формируется матрица сравнений. Данная матрица служит исходной основой для последующего определения весовых коэффициентов критериев.

Дальнейший анализ предполагает вычисление собственных векторов альтернатив для каждого критерия. Для альтернативы i по критерию k определяется компонент вектора $U_i^{(k)}$, который рассчитывается как среднегеометрическое произведение элементов соответствующей строки матрицы попарных сравнений:

$$U_i^{(k)} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} V_{ij}^{(k)}} = \sqrt[n]{V_{i1}^{(k)} \times V_{i2}^{(k)} \times \ldots \times V_{in}^{(k)}}. \quad (1)$$

Следующий шаг включает процедуру нормализации вычисленных собственных векторов, в результате которой определяются относительные веса альтернатив по каждому критерию и веса самих критериев. Вес альтернативы i по критерию k, обозначаемый $W_i^{(k)}$, вычисляется как отношение соответствующей компоненты собственного вектора к сумме всех компонент по данному критерию:

$$W_i^{(k)} = \frac{U_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^{n} U_i^{(k)}} = \frac{U_i^{(k)}}{U_1^{(k)} + U_2^{(k)} + \ldots + U_n^{(k)}}. \quad (2)$$

Аналогичная процедура применяется для определения весовых коэффициентов критериев $W_{\text{крит}}^{(k)}$, где $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

После получения весов альтернатив и критериев становится возможным расчёт интегральной функции полезности для каждой альтернативы. Итоговая оценка определяется как взвешенная сумма значений полезности по всем критериям:

$$F_i = \sum_{k=1}^{m} W_i^{(k)} \times W_{\text{крит}}^{(k)} = W_i^{(1)} \times W_{\text{крит}}^{(1)} + W_i^{(2)} \times W_{\text{крит}}^{(2)} + \ldots + W_i^{(m)} \times W_{\text{крит}}^{(m)}. \quad (3)$$

Сравнение значений агрегированной функции полезности позволяет выявить оптимальную альтернативу, характеризующуюся её максимальным значением.

Так, согласно данным, приведенным на рис. 3, наглядно видно, что функция полезности A_1 равна 3,86 (Autodesk Construction Cloud); функция полезности A_2 равна 2,602 (Trimble Connect); функция полезности A_3 равна 1,466 (BIM 360); функция полезности A_4 равна 14,377 (Renga + Pilot-BIM); функция полезности A_5 равна 4,376 (BIM Cloud), функция полезности A_6 равна 0,823 (PlanRadar).

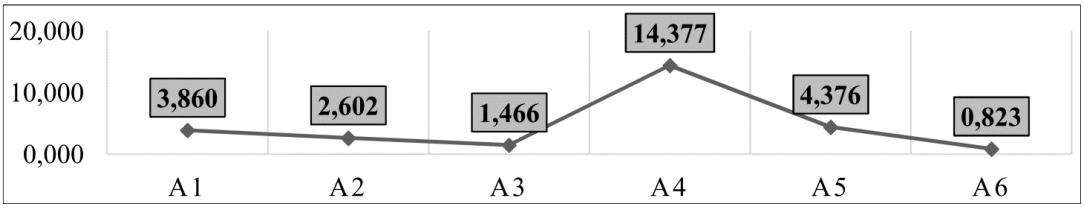


Рис. 3. Функции полезности альтернатив
Fig. 3. Utility functions of alternatives

Таким образом, в условиях отечественного рынка оптимальным решением для внедрения в строительную компанию является комплексное использование платформы Renga (проектирование и BIM) и Pilot-BIM (CDE и управление проектами).

Такой выбор обусловлен рядом факторов – технологических, организационных, экономических и нормативных, что отражено в табл. 5 [20].

Таблица 5

Обоснование выбора платформы Renga + Pilot-BIM

Table 5

Rationale for choosing the Renga + Pilot-BIM platform

№ п/п	Критерий выбора	Описание
1	Соответствие российским стандартам и нормативной базе	Renga и Pilot-BIM полностью соответствуют требованиям ГОСТ Р 21.1101–2020, СПДС и стандартам ТИМ, утверждённым Минстроем РФ. Это критически важно, поскольку с 2022 г. для государственных заказчиков обязательным стало использование технологий информационного моделирования при проектировании и строительстве (Постановление Правительства РФ № 1431 от 15.09.2020)

Окончание табл. 5
Table 5 (end)

№ п/п	Критерий выбора	Описание
2	Отечественная разработка и независимость от зарубежного ПО	В отличие от иностранных решений (Autodesk Revit, Trimble Connect, Bentley Systems), связка Renga + Pilot-BIM создана российскими компаниями АСКОН и Pilot-Инжиниринг, что гарантирует: • устойчивость к санкционным ограничениям; • наличие локальной поддержки и обновлений; • интеграцию с отечественными ИТ-продуктами (1С, Минстрой CDE, ГИСОГД)
3	Технологическая совместимость	Renga обеспечивает проектирование в формате 3D/5D/7D, а Pilot-BIM – управление проектом, документооборотом и контроль версий. Обе системы поддерживают формат IFC, что позволяет обмениваться моделями с другими участниками без потери данных
4	Экономическая эффективность	Стоимость внедрения отечественного комплекса в среднем на 40–50 % ниже, чем зарубежных аналогов, а затраты на лицензии, обновления и обучение сотрудников – в 2 раза меньше. По данным CSD Analytics (2024), ROI от внедрения Renga + Pilot-BIM достигает 28–32 %, а срок окупаемости проекта – около 2 лет
5	Простота обучения и локализация интерфейсов	Renga имеет интуитивно понятный интерфейс, полностью локализованный на русском языке, что сокращает сроки обучения инженеров и проектировщиков. Pilot-BIM позволяет быстро адаптировать структуру проектов под нужды компании без сложного программирования
6	Интеграция с ERP и аналитикой	Платформа интегрируется с 1С, Microsoft Power BI, Excel и корпоративными базами данных, что обеспечивает полное цифровое управление затратами, сметами и ресурсами

Также в качестве подтверждения состоятельности исследования приведем реальный кейс, подтверждающий эффективность внедрения ЦП Renga + Pilot-BIM.

Так, компания Setl Group [21] успешно внедрила связку Renga + Pilot-BIM, отказавшись от зарубежных аналогов. По результатам внедрения отмечено:

- ускорение документооборота и согласований до 3 %;
- сокращение количества проектных ошибок и коллизий на 35–40 %;
- повышение прозрачности взаимодействия проектных подразделений.

Кроме того, LEGENDA также внедрила Pilot-BIM как базовую CDE для управления проектной документацией. Это позволило обеспечить соответствие новым требованиям к хранению и передаче BIM-моделей в рамках государственной экспертизы, а также ускорило процесс обновления проектных версий [22].

Таким образом, анализ реальных кейсов подтверждает, что связка Renga + Pilot-BIM обеспечивает комплексный эффект цифровизации строительных процессов. Опыт Setl Group и LEGENDA демонстрирует достижение экономических и организационных результатов.

Выбор отечественных платформ также соответствует политике технологического суверенитета и требованиям к импортозамещению в сфере цифрового проектирования, что дополнительно снижает риски зависимости от зарубежного ПО и ограничений по лицензиям.

Заключение

Проведённое исследование подтверждает, что цифровая трансформация является ключевым фактором повышения эффективности и устойчивого развития строительных предприятий России. Анализ научных публикаций и отраслевых отчетов показал, что внедрение BIM-технологий,

роботизации, 3D-печати, модульного строительства, цифровых двойников и IoT обеспечивает сокращение сроков реализации проектов, снижение затрат, рост производительности и повышение качества проектной документации. Несмотря на положительную динамику развития инновационной активности отрасли, сохраняется ряд системных барьеров: кадровый дефицит, нормативные ограничения, несовместимость цифровых инструментов и высокая стоимость внедрения новых технологий.

Оценка цифровых платформ управления жизненным циклом строительного объекта методом анализа иерархий (МАИ) позволила определить оптимальное решение для российских строительных организаций. На основе сопоставления шести альтернатив по критериям нормативного соответствия, технологической совместимости, экономической эффективности и степени интеграции было установлено, что наиболее предпочтительной является связка Renga + Pilot-BIM. Данное решение обеспечивает полное соответствие российским стандартам ТИМ, независимость от зарубежного ПО, интеграцию с ERP-системами, снижение стоимости внедрения и повышение прозрачности производственных процессов.

Анализ практических кейсов (Setl Group, LEGENDA) подтвердил, что применение отечественных платформ приводит к сокращению количества ошибок проектирования, ускорению документооборота, повышению согласованности действий участников и снижению сроков подготовки проектной документации. Это доказывает высокую прикладную значимость разработанной методики выбора платформы и её соответствие задачам технологического суверенитета.

Таким образом, результаты исследования имеют как теоретическую, так и практическую ценность. Они обосновывают необходимость системного подхода к инновационному менеджменту, формируют методологию выбора цифровой платформы и демонстрируют, что внедрение отечественных решений типа Renga + Pilot-BIM является наиболее эффективной стратегией для российских строительных компаний в условиях перехода к цифровому управлению жизненным циклом объектов.

Список литературы

1. ДОМ.РФ: более 700 застройщиков используют технологии информационного моделирования // ДОМ.РФ: сайт. 2024. URL: https://xn--80az8a.xn--d1aqf.xn--p1ai/медиа/новости/2024/03/дом.рф-более-700-застройщиков-используют-технологии-информационного-моделирования (дата обращения: 27.11.2025).

2. ПИК: инструменты для анализа BIM-данных. PropTech.Media: сайт. URL: https://www.proptech.media/articles/tpost/mo8yt9n951-pik-instrumenti-dlya-analiza-bim-dannih (дата обращения: 27.11.2025).

3. Стройка 3D: Никита Чен-юн-тай первым в России напечатал дом // РБК. 2017. URL: https://www.rbc.ru/magazine/2017/06/592567559a7947e1bb4b7ea9 (дата обращения: 27.11.2025).

4. Bock T. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics // Automation in Construction. 2015. Vol. 59. P. 113–121. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.022. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092658051500165X?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 30.11.2025).

5. Robotics in the Construction Industry: A Bibliometric Review of Recent Trends and Technological Evolution / L. Xu, Y. Zhang, M. Liu et al. // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, no. 11. P. 6277. DOI: 10.3390/app15116277. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6277 (дата обращения: 30.11.2025).

6. Ahmed G.H. A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 66. P. 105863. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.105863. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223000426 (дата обращения: 30.11.2025).

7. Advancement in Sustainable 3D Concrete Printing: A Review on Materials, Challenges, and Current Progress in Australia / K. Gamage, S. Fawzia, T. Zahra et al. // Buildings. 2024. Vol. 14. P. 494. DOI: 10.3390/buildings14020494. URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/14/2/494 (дата обращения: 30.11.2025).

8. Modular Construction: A Comprehensive Review / M. Zohourian, A. Pamidimukkala, S. Kermanshachi, D. Almaskati // Buildings. 2025. Vol. 15. P. 2020. DOI: 10.3390/buildings15122020. URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/15/12/2020 (дата обращения: 30.11.2025).

9. Molina A.A., Huang Y., Jiang Y. A Review of Unmanned Aerial Vehicle Applications in Construction Management: 2016–2021 // Standards. 2023. Vol. 3. P. 95–109. DOI: 10.3390/standards3020009. URL: https://www.mdpi.com/2305-6703/3/2/9 (дата обращения: 30.11.2025).

10. Opoku D.-G.J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M. Digital twin application in the construction industry: a literature review // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 40. P. 102726. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102726. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221005842 (дата обращения: 30.11.2025).

11. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions / H. Omrany, K.M. Al-Obaidi, A. Husain, A. Ghaffarianhoseini // Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 14. P. 10908. DOI: 10.3390/su151410908. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/10908 (дата обращения: 30.11.2025).

12. Индикаторы инновационной деятельности: 2024: статистический сборник / В.В. Власова, Л.М. Гохберг, Г.А. Грачева и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. 260 с.

13. PwC. Innovate smarter: How AI is transforming Research and Development [Электронный ресурс]. PwC, 2025. 23 p. URL: https://www.pwc.com/gx/en/ai-services/ai-in-research-and-development.pdf (дата обращения: 30.11.2025).

14. McKinsey & Company. The construction productivity imperative [Электронный ресурс]. McKinsey & Company, 2015. 48 с. Available at: https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/The%20construction%20productivity%20imperative/The%20construction%20productivity%20imperative.pdf (дата обращения: 30.11.2025).

15. RICS. Digitalisation in Construction Report 2023 [Электронный ресурс]. RICS, 2023. 52 с. URL: https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/research/Digitalisation%20in%20construction%202023_final.pdf (дата обращения: 30.11.2025).

16. Digital Twins in Construction: Architecture, Applications, Trends and Challenges / Z. Yang, C. Tang, T. Zhang et al. // Buildings. 2024. Vol. 14 (9). P. 2616. DOI: 10.3390/buildings14092616

17. Жданова М.В., Лапидус А.А. Управление жизненным циклом объектов строительства посредством определения точек сокращения продолжительности этапов // Строительство и архитектура. 2025. Vol. 13, no. 3. P. C0005. DOI: 10.29039/2308-0191-2025-13-3-C0005

18. Russia Building Information Modeling (BIM) Market Report 2025–2033 // IMARC Group: сайт. 2025. URL: https://www.imarcgroup.com/russia-building-information-modeling-market (дата обращения: 22.10.2025).

19. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Насонова Т.В. Математические методы проведения экспертной оценки качественных показателей // Управление строительством. 2018. № 2 (11). С. 6–35.

20. АСКОН на BIMAC: новаторство Renga, Pilot-BIM у девелоперов и анонс Pilot-Cloud // АСКОН: сайт. 2023. URL: https://ascon.ru/news/2023/04/27/askon-na-bimac-novatorstvo-renga-pilot-bim-u-developerov-i-anons-pilot-cloud/ (дата обращения: 30.11.2025).

21. Холдинг Setl Group выбирает Renga и Pilot-BIM для проектирования многоэтажного жилья // Renga: сайт. 2025. URL: https://rengabim.com/news-bim-renga/kholding-setl-group-vybiraet-renga-i-pilot-bim-dlya-proektirovaniya-mnogoetazhnogo-zhilya/?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 30.11.2025).

22. Легендарный BIM: как девелопер LEGENDA перешел на СОД от АСКОН // АСКОН: сайт. 2025. URL: https://ascon.ru/news_and_events/news/3940/?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 30.11.2025).

References

1. *DOM.RF: boleye 700 zastroyshchikov ispol'zuyut tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya* [More than 700 developers use information modeling technologies]. 2024. *DOM.RF: website*. (In Russ.) Available at: https://xn--80az8a.xn--d1aqf.xn--p1ai/медиа/новости/2024/03/дом.рф-более-700-застройщиков-используют-технологии-информационного-моделирования (accessed 27.11. 2025).

2. *PIK: instrumenty dlya analiza BIM-dannykh* [PIC: tools for BIM data analysis]. *PropTech.Media: website*. 2024. (In Russ.) Available at: https://www.proptech.media/articles/tpost/mo8yt9n951-pik-instrumenti-dlya-analiza-bim-dannih (accessed 27.11. 2025).

3. *Stroyka 3D: Nikita Chen-yun-tay pervym v Rossii napechatal dom* [3D Construction: Nikita Chen-yun-tai became the first Russian to print a house]. *RBC: website*. 2017. (In Russ.) Available at: https://www.rbc.ru/magazine/2017/06/592567559a7947e1bb4b7ea9 (accessed 27.11. 2025).

4. Bock T. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*. 2015;59:113–121. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.022. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092658051500165X?utm_source=chatgpt.com (accessed 30.11.2025).

5. Xu L., Zhang Y., Liu M. et al. Robotics in the Construction Industry: A Bibliometric Review of Recent Trends and Technological Evolution. *Applied Sciences*. 2025;15(11):6277. DOI: 10.3390/app15116277. Available at: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6277 (accessed 30.11.2025)

6. Ahmed G.H. A Review of «3D concrete printing»: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*. 2023;66:105863. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.105863. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223000426 (accessed 30.11.2025).

7. Gamage K., Fawzia S., Zahra T., Teixeira M.B.F., Ramli Sulong N.H. Advancement in Sustainable 3D Concrete Printing: A Review on Materials, Challenges, and Current Progress in Australia. *Buildings*. 2024;14:494. DOI: 10.3390/buildings14020494. Available at: https://www.mdpi.com/2075-5309/14/2/494 (accessed 30.11.2025).

8. Zohourian M., Pamidimukkala A., Kermanshachi S., Almaskati D. Modular Construction: A Comprehensive Review. *Buildings*. 2025;15:2020. DOI: 10.3390/buildings15122020. Available at: https://www.mdpi.com/2075-5309/15/12/2020 (accessed 30.11.2025).

9. Molina A.A., Huang Y., Jiang Y. A Review of Unmanned Aerial Vehicle Applications in Construction Management: 2016–2021. *Standards*. 2023;3:95–109. DOI: 10.3390/standards3020009. Available at: https://www.mdpi.com/2305-6703/3/2/9 (accessed 30.11.2025).

10. Opoku D.-G.J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M. Digital twin application in the construction industry: a literature review. *Journal of Building Engineering*. 2021;40:102726. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102726. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221005842 (accessed 30.11.2025).

11. Omrany H., Al-Obaidi K.M., Husain A., Ghaffarianhoseini A. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. *Sustainability*. 2023;15(14):10908. DOI: 10.3390/su151410908. Available at: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/10908 (accessed 30.11.2025).

12. Vlasova V., Gokhberg L., Gracheva G. et al.; National Research University Higher School of Economics. *Indicators of Innovation in the Russian Federation: 2024: Data Book*. Moscow: ISSEK HSE, 2024. 260 p. (In Russ.)

13. PwC. *Innovate smarter: How AI is transforming Research and Development* [Electronic resource]. PwC, 2025. 23 p. Available at: https://www.pwc.com/gx/en/ai-services/ai-in-research-and-development.pdf (accessed 30.11.2025).

14. McKinsey & Company. *The construction productivity imperative* [Electronic resource]. McKinsey & Company, 2015. 48 p. Available at: https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/The%20construction%20productivity%20imperative/The%20construction%20productivity%20imperative.pdf (accessed 30.11.2025).

15. RICS. *Digitalisation in construction report 2023* [Electronic resource]. RICS, 2023. 52 c. Available at: https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/research/Digitalisation%20in%20construction%202023_final.pdf (accessed 30.11.2025).

16. Yang Z., Tang C., Zhang T., Zhang Z., Doan D.T. Digital Twins in Construction: Architecture, Applications, Trends and Challenges. *Buildings*. 2024;14(9):2616. DOI: 10.3390/buildings14092616

17. Zhdanova M.V., Lapidus A.A. Construction projects life cycle management by identifying points of shortening of phases. *Construction and Architecture*. 2025;13(3):C0005. (In Russ.) DOI: 10.29039/2308-0191-2025-13-3-C0005

18. Russia Building Information Modeling (BIM) Market Report 2025–2033. *IMARC Group: website.* 2025. Available at: https://www.imarcgroup.com/russia-building-information-modeling-market (accessed 22.10.2025).

19. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Nasonova T.V. Expert evaluation mathematical methods of quality indicators. *Upravleniye stroitel'stvom*. 2018;2(11):6–35. (In Russ.)

20. *ASKON na BIMAC: novatorstvo Renga, Pilot-BIM u developerov i anons Pilot-Cloud* [ASCON on BIMAC: Renga's innovation, Pilot-BIM among developers and the announcement of Pilot-Cloud]. *ASCON: website*. 2023. (In Russ.) Available at: https://ascon.ru/news/2023/04/27/askon-na-bimac-novatorstvo-renga-pilot-bim-u-developerov-i-anons-pilot-cloud/ (accessed 30.11.2025).

21. *Kholding Setl Group vybiraet Renga i Pilot-BIM dlya proektirovaniya mnogoetazhnogo zhil'ya* [Setl Group Holding Chooses Renga and PilotBIM for the Design of Multi-Storey Housing]. *Renga: website*. 2025. (In Russ.) Available at: https://rengabim.com/news-bim-renga/kholding-setl-group-vybiraet-renga-i-pilot-bim-dlya-proektirovaniya-mnogoetazhnogo-zhilya/?utm_source=chatgpt.com (accessed 30.11.2025).

22. *Legendarnyy BIM: kak developer LEGENDA pereshel na SOD ot ASKON* [Legendary BIM: how the developer LEGENDA switched to SOD from ASCON]. *ASCON: website*. 2025. Available at: https://ascon.ru/news_and_events/news/3940/?utm_source=chatgpt.com (accessed 30.11.2025).

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и инновационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@nm.ru.

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ta_averina@mail.ru.

Пелихова Анастасия Сергеевна, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; anastasiapelihova004@gmail.com.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Dean of the Faculty of Economics, Management and Innovation Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@nm.ru.

Tatiana A. Averina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta_averina@mail.ru.

Anastasia S. Pelikhova, Master's student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; anastasiapelihova004@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2025
The article was submitted 30.11.2025

Научная статья
УДК 004.93
DOI: 10.14529/ctcr260102

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРОСЕК ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА НЕЗАКОННЫХ ВЫРУБОК ЛЕСА

О.И. Соколков[1, 2], *sokolkovoi@uriit.ru, https://orcid.org/0009-0006-5869-1395*
[1] *Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия*
[2] *Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

Аннотация. Данная работа посвящена проблеме автоматизированного выявления лесных рубок по данным дистанционного зондирования Земли в контексте проведения своевременных мероприятий по защите лесного законодательства. Поскольку визуальное дешифрирование спутниковых снимков характеризуется низкой производительностью ввиду человеческого фактора (утомляемость и снижение концентрации внимания при длительном выполнении монотонной работы), в условиях стремительного развития технологий искусственного интеллекта широкое распространение приобретают автоматизированные системы мониторинга незаконных лесных рубок, основанные на нейросетевых методах. Такие решения, сочетающие возможности человеческого восприятия и потенциал нейронных сетей, обеспечивают высокую точность и оперативность обработки больших объёмов спутниковых данных, повышая результативность мер по охране лесного фонда. Несмотря на успешное применение нейросетевых методов в рассматриваемой предметной области, их использование на практике сталкивается с существенными трудностями, обусловленными недостаточной эффективностью распознавания незаконно вырубленных лесных просек, предназначенных для прокладки дорог, линий электропередачи, трубопроводов. Это приводит к невозможности выявления существенной части нарушений лесного законодательства. **Цель исследования:** повышение точности распознавания лесных просек на спутниковых снимках без снижения качества распознавания рубок других типов. **Материалы и методы.** Предложен метод, основанный на ансамблировании нейронных сетей, предусматривающий обучение моделей с использованием модифицированной функции потерь Tversky Loss и аггрегацию выходов посредством побитовых операций. Для подтверждения результативности метода проведена серия экспериментов на наборе данных о лесных рубках, осуществленных на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры за период 2018–2022 гг. Данные представлены размеченными изображениями со спутника Sentinel-2 и охватывают периоды как «бесснежного» сезона рубок (июнь–сентябрь), так и «снежного» (ноябрь–апрель). **Результаты.** Предложенный метод позволил повысить точность распознавания лесных просек по показателю F1-меры на 5,35 % для «бесснежного» сезона и на 6,8 % – для «снежного» сезона без потерь в качестве распознавания других типов вырубок. **Заключение.** Полученные результаты могут послужить основой для дальнейших аналогичных исследований, ориентированных на другие сложные для распознавания типы рубок, в частности, загражденные плотной облачностью, дымкой, облачными тенями.

Ключевые слова: картографирование лесных рубок, компьютерное зрение, глубокое машинное обучение, ансамблирование, семантическая сегментация изображений, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2

Для цитирования: Соколков О.И. Повышение точности распознавания просек для эффективного спутникового мониторинга незаконных вырубок леса // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 21–32. DOI: 10.14529/ctcr260102

© Соколков О.И., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260102

IMPROVING THE DETECTION ACCURACY OF LINEAR CLEAR-CUTS FOR EFFECTIVE SATELLITE MONITORING OF ILLEGAL FOREST FELLING

O.I. Sokolkov[1, 2], *sokolkovoi@uriit.ru, https://orcid.org/0009-0006-5869-1395*
[1] *Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia*
[2] *Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia*

Abstract. This work is devoted to the problem of automated detection of forest fellings based on Earth remote sensing data in the context of timely measures to protect forest legislation. Manual image analysis is inefficient due to human fatigue caused by prolonged monotonous work, leading to increased interest in neural network-based monitoring systems enabled by recent advances in artificial intelligence technology. Such solutions combining human perception capabilities with the potential of neural networks provide high accuracy and speed in processing large volumes of satellite data, thus improving the effectiveness of measures aimed at protecting forest resources. Although neural network methods have been successfully applied in the considered field, their practical implementation encounters substantial challenges stemming from insufficient performance in detecting illegally cleared areas designated for constructing roads, power lines, and pipelines. This makes it impossible to detect a significant portion of forestry law violations. **Aim of the study.** Improving the accuracy of linear forest clear-cuts recognition in satellite images without reducing the quality of recognition of other types of felling. **Materials and methods.** A method is proposed based on neural network ensemble learning, which incorporates a modified Tversky Loss function for model training and applies bitwise aggregation of outputs. Its efficacy was tested through experiments on a dataset of forest logging activities in Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra between 2018 and 2022. This dataset includes labeled Sentinel-2 satellite imagery covering both “snowless” (June–September) and “snowy” (November–April) felling seasons. **Results.** Proposed method improved linear forest clear-cuts detection accuracy by 5.35 % for “snowless” season and by 6.8 % for “snowy” season, with no decrease in recognition quality for other clearing types. **Conclusion.** Obtained results provide a foundation for future research targeting hard-to-detect felling activities, especially those concealed by dense clouds, haze, or cloud shadows.

Keywords: forest felling mapping, computer vision, deep learning, ensembling, semantic image segmentation, Earth remote sensing, Sentinel-2

For citation: Sokolkov O.I. Improving the detection accuracy of linear clear-cuts for effective satellite monitoring of illegal forest felling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):21–32. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260102

Введение

В субъектах Российской Федерации с большой площадью лесного покрова важнейшими направлениями природоохранной деятельности являются систематический мониторинг состояния лесных экосистем и рациональное использование их ресурсов. Особенно актуально усиление мер по защите лесов в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре (Тюменская область), обусловленное масштабным освоением территорий, включая разведку, добычу, транспортировку нефти и газа. Реализация ряда инфраструктурных проектов сопряжена с неизбежностью сокращения площади лесных массивов, вследствие чего приобретают актуальность действенные инструменты защиты лесных ресурсов, направленные на предотвращение незаконных вырубок.

Одним из таких инструментов мониторинга лесных территорий является визуальное дешифрирование спутниковых снимков на предмет выявления вырубок, традиционно выполняемое оператором-человеком. Специалист исследует каждую свободную от облаков зону спутникового снимка с целью обнаружить участки с недавно поврежденным лесным покровом. Повышению точности идентификации способствует сравнительный анализ пары разновременных снимков одной и той же местности, что существенно облегчает выявление искомых участков, особенно в сложных ситуациях. При обнаружении поврежденных участков оператор очерчивает границы этого участка с помощью специализированного программного обеспечения, затем сверяет найденный объект с базой данных санкционированных лесных рубок. В случае подтверждения факта незаконного вмешательства оператор уведомляет органы надзора для проведения последующего полевого обследования.

Стоит отметить ограничения традиционного подхода, основным из которых является влияние на результат психофизиологических особенностей человека. Усталость снижает способность оператора фокусироваться, отвлекающие внешние стимулы нарушают концентрацию внимания, что в итоге приводит к пропуску существенной доли нарушений. Несмотря на удовлетворительную точность ручных процедур, производительности даже десяти операторов недостаточно для систематической, качественной и оперативной обработки спутниковых данных по субъекту с территорией, сопоставимой или превосходящей площадь ХМАО-Югры.

Появляется необходимость минимизировать влияние вышеперечисленных ограничений. Сегодня наблюдается активный рост популярности нейросетевых технологий, включая их применение в обработке изображений. Особое внимание уделяется разработке алгоритмов, предназначенных для обнаружения участков с поврежденным лесным покровом, в частности, незаконно вырубленных территорий. В [1–20] исследуются возможности применения нейронных сетей в данном контексте. В большинстве работ [3, 5, 15, 17, 18] высокую результативность демонстрируют сверхточные нейросетевые архитектуры. В работах [19, 20] показано, что более высокую результативность могут показывать трансформерные нейросетевые архитектуры. Результаты этих исследований указывают на то, что современные нейросетевые методы могут быть применены в контексте спутникового мониторинга лесных территорий.

Тем не менее возлагать всю ответственность за мониторинг незаконных лесных рубок исключительно на нейросетевые системы представляется необоснованным. Несмотря на то, что применение нейронных сетей намного ускоряет выявление лесных нарушений, качество обводки целевых объектов уступает человеческому уровню. Как следствие, пригодным практическим решением является использование автоматизированного подхода, в рамках которого нейронные сети определяют возможные зоны рубок, а операторы проверяют и подтверждают эти данные.

При такой результативной комбинации искусственного интеллекта и человеческого контроля в ряде специфичных случаев остаются проблемы следующего вида: избыточное выделение ложных объектов, недостаточно точное определение границ поврежденных участков, пропуски целевых участков. Эти недостатки оказывают непосредственное влияние на работу оператора. Ложные объекты требуют дополнительного времени на проверку и исключение. Неточно очерченные границы означает дополнительные траты времени на редактирование обводки. Полностью пропущенный нейронной сетью объект игнорируется оператором, поскольку его решение основано исключительно на выводах нейросетевого алгоритма, а не на самостоятельном просмотре всего доступного снимка.

Применение нейросетевых моделей сталкивается с рядом специфических трудностей при обнаружении лесных рубок. Возникают случаи, когда условия съемки затрудняют идентификацию (облачность, тени от облаков, туман), что значительно снижает эффективность поиска. Также существуют ситуации, когда за рубку принимается объект иного происхождения (ветровалы, цветения на болотах, выцветание травы, высыхание берегов рек и озер, участки лесной гари с частично восстановленной растительностью). Третий аспект касается пропуска или неполной обводки точечных и линейных рубок, примером которых являются дорожные сооружения и недавно созданные точечные вырубленные участки, которые еще не успели расшириться. Такие пропуски создают условия для беспрепятственного выполнения нарушителями именно таких видов рубок.

Настоящая работа представляет метод, направленный на улучшение качества распознавания линейных рубок (просек) без снижения эффективности распознавания других разновидностей вырубок. Метод способствует повышению продуктивности автоматизированного спутникового мониторинга. В дальнейшем предполагается проверить его действенность применительно к другим вышеописанным проблемным случаям.

Материалы

Исследование проведено на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО), находящегося в пределах Тюменской области Российской Федерации. Регион расположен в зоне бореальных лесов, включающих светлохвойные, темнохвойные, мелколиственные и смешанные леса. Округ активно развивает инфраструктуру нефтегазового комплекса и энерго-

системы, что приводит к появлению сложно определяемых нейросетевым методом спутникового мониторинга лесных просек, отмеченных ранее. Местная территория характеризуется резкой сезонностью климата, проявляющейся в наличии двух отчетливых сезонов лесных рубок: «бесснежного» (июнь – сентябрь) и «снежного» (ноябрь – апрель). Это предполагает обязательный учет обоих сезонов при усовершенствовании нейросетевых технологий природоохранного мониторинга.

Рассматриваются спутниковые снимки миссии Sentinel-2 уровня обработки L1C [21], в рамках которой выполняется систематическая мультиспектральная съемка поверхности Земли с полосой захвата 290 км. Спутники-дублеры Sentinel-2A и Sentinel-2B осуществляют повторную съемку территорий с интервалом 5 дней на экваторе и каждые 2–3 дня в средних широтах. Такие характеристики позволяют обеспечить регулярный мониторинг состояния земной поверхности. Произведенные снимки предоставляются в открытый доступ и представляют собой 13-канальные изображения пространственного разрешения от 10 до 60 метров. Каждый снимок Sentinel-2 охватывает территорию 100×100 километров.

Для исследования были отобраны свободные от облачности спутниковые снимки, соответствующие рассматриваемой территории. Путём нарезки и перепроецирования растровых изображений сформированы размеченные пары кадров, каждая из которых охватывает участок площадью $5{,}12 \times 5{,}12$ кв. км. Каждая пара включает в себя три элемента: «текущий» кадр (соответствует текущему моменту времени), «старый» кадр (соответствует предшествующему моменту времени) и подготовленную оператором бинарную маску лесных рубок (рис. 1).

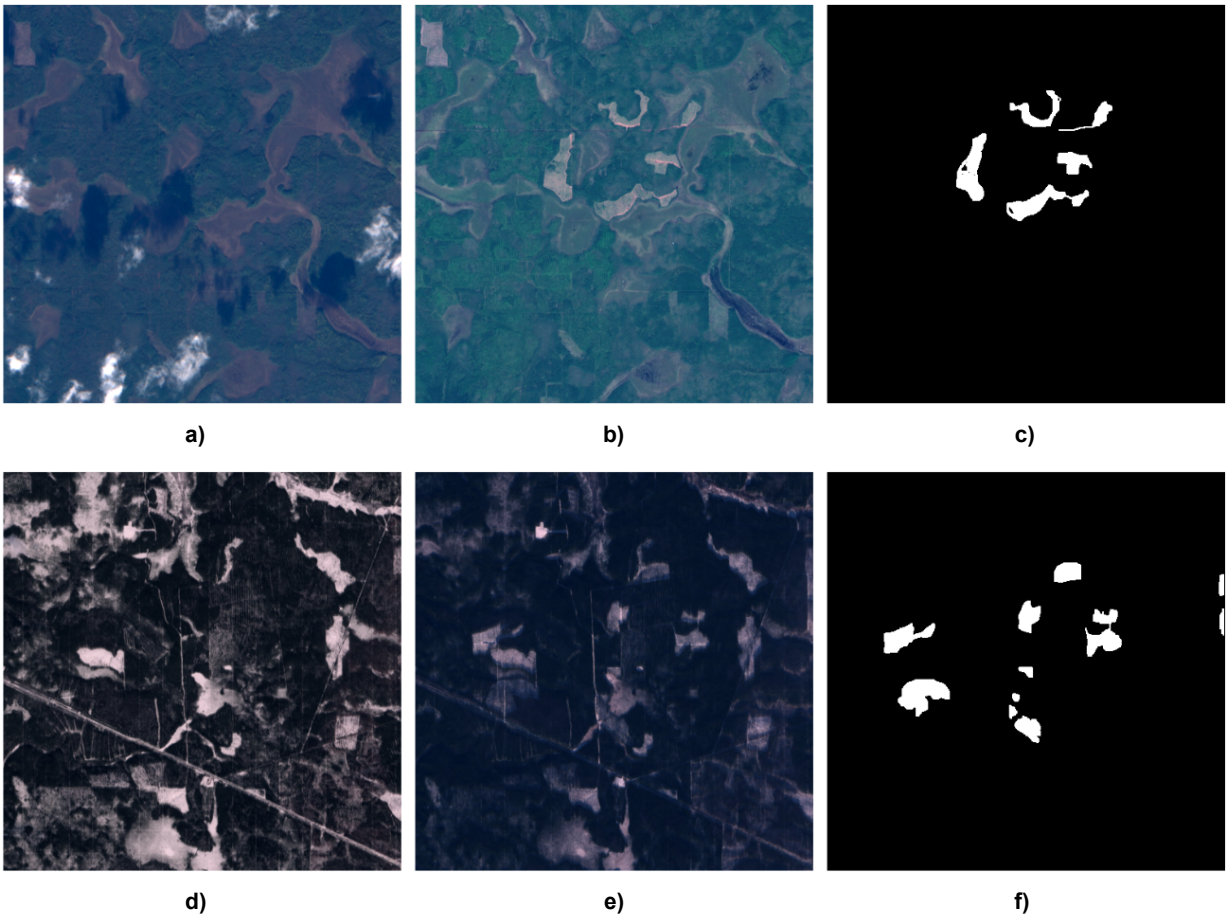


Рис. 1. Визуализация размеченных пар кадров: a, b, c – «старый» кадр, «текущий» кадр, маска рубок «бесснежного» сезона соответственно; d, e, f – «старый» кадр, «текущий» кадр, маска рубок «снежного» сезона соответственно

Fig. 1. Visualization of annotated frame pairs: a, b, c – “old” frame, “current” frame, and felling mask for the “snowless” season respectively; d, e, f – “old” frame, “current” frame, and felling mask for the “snowy” season respectively

Белый пиксель на маске указывает на нарушение лесного покрова вследствие вырубки на соответствующем участке «текущего» кадра по сравнению со «старым» кадром. Черный цвет означает, что на участке «нового» кадра отсутствуют признаки лесной рубки. Следует отметить, что операторы выделяют чёрным цветом также те участки, где выявлено нарушение лесного покрова, имеющее иную природу происхождения, отличную от рубок (ветровалы, пожары и подтопления, отличимые на снимках Sentinel-2 от участков с вырубками).

Пространственное распределение размеченных пар показано на рис. 2. Зелёным цветом отмечены кадры «бесснежного» сезона, синим – «снежного». Набор данных включает в себя 5522 размеченные пары кадров (2691 пара «бесснежного» сезона и 2831 пара «снежного» сезона). Среди размеченных пар имеются как те, которые охватывают как минимум один вырубленный лесной участок, так и те, на которых рубки полностью отсутствуют. Вследствие неравномерного распределения вырубок по рассматриваемой территории наблюдается группирование размеченных пар в виде отдельных кластеров со случаями частичного пространственного пересечения.

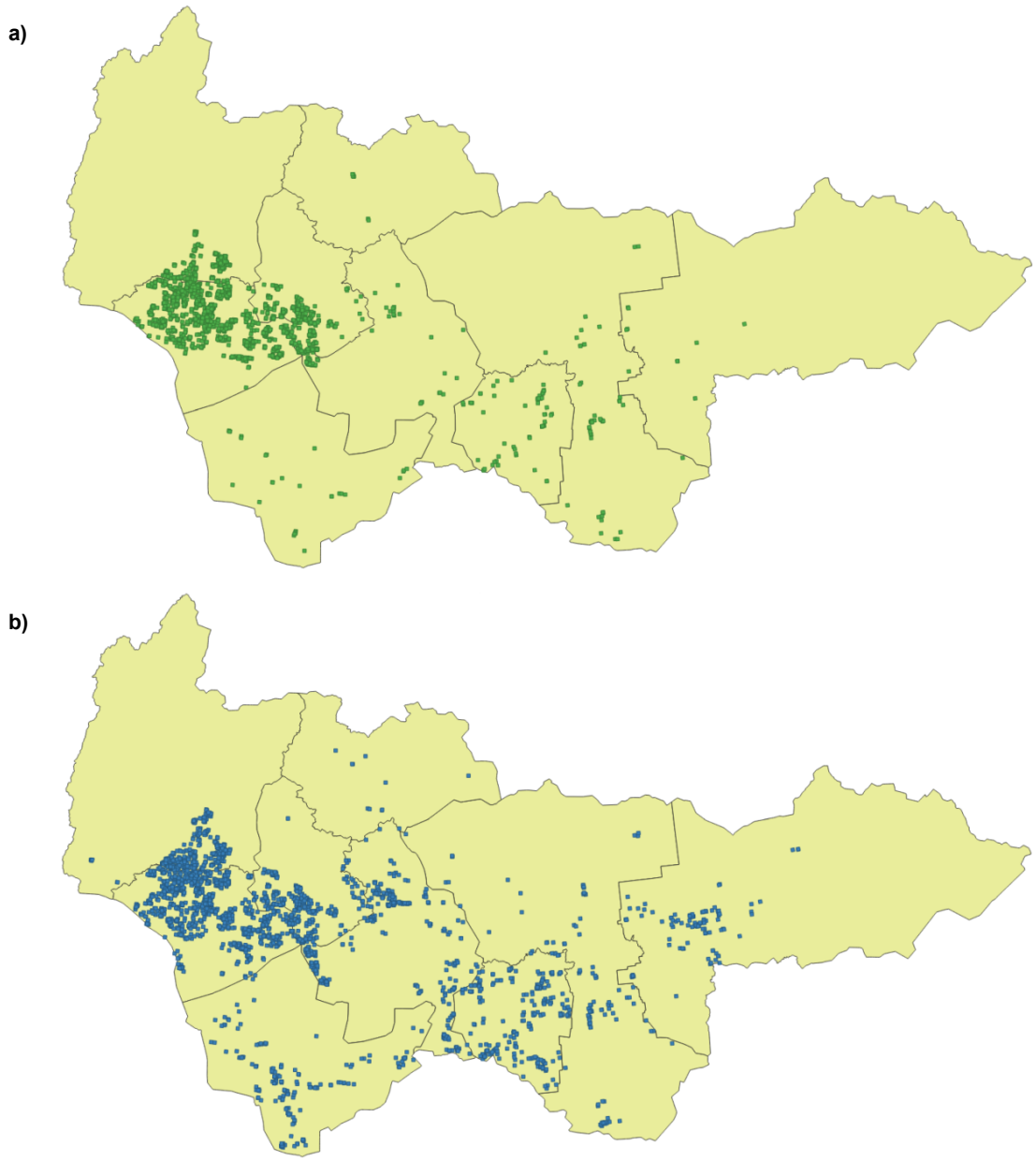


Рис. 2. Распределение размеченных пар кадров по территории ХМАО-Югры: a – пары «бесснежного» сезона; b – пары «снежного» сезона

Fig. 2. Distribution of annotated frame pairs across the territory of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra: a – “snowless” season pairs; b – “snowy” season pairs

Методы

Рассматривается задача бинарной семантической сегментации разновременной пары пространственно согласованных спутниковых изображений. Требуется сформировать маску рубок на основе «текущего» и «старого» кадров, что на практике означает имитацию поведения человека-оператора. Предполагается реализация нейросетевого моделирования, подразумевающая в данном контексте обучение нейронных сетей на тренировочной выборке размеченных пар кадров, систематический мониторинг обучаемых моделей на предмет переобучения путём апробации на валидационной выборке, итоговую оценку качества модели на независимой тестовой выборке.

Предлагаемое в рамках настоящей работы решение основывается на построении ансамбля независимых нейросетевых моделей, каждая из которых формирует собственную маску лесных рубок – и впоследствии их прогнозы отображаются в единый результирующий прогноз от всего ансамбля. Каждая отдельно взятая модель обучается по принципу «мягкой» специализации с «осторожным» выходом за ее пределы. Под «мягкостью» специализации подразумевается наличие у каждой модели ансамбля собственного профиля (ряд заранее известных ситуаций, при возникновении которых от модели ожидается наибольшая результативность), но при этом они также обучаются справляться задачами вне своей специфики, пусть и с меньшей эффективностью. Термином «осторожность» обозначено желаемое поведение модели в процессе вывода решений: если случившаяся ситуация выходит за рамки профиля модели – она должна быть склонной к ложноотрицательным ошибкам (пропускать объекты), а не ложноположительным. Окончательный прогноз получается путем объединения бинарных масок, сформированных отдельными моделями, посредством логического оператора «ИЛИ». Его применение в сочетании с ранее представленным принципом «осторожности» позволяет смягчить проблему накопления ложноположительных ошибок при получении агрегированного вывода.

Для задачи выявления лесных рубок предлагается использовать ансамбль из следующих двух моделей. Первая модель настраивается таким образом, чтобы она была специализированной именно на выявлении «тонких» видов рубок (точечных и линейных), при этом имела тенденцию совершать ложноотрицательные ошибки по всем остальным рубкам (далее именуются «широкими»). Вторая модель настраивается прямо противоположным образом.

Чтобы зафиксировать модель таким образом, чтобы она выделяла исключительно тонкие вырубки, необходимо предварительно определить понятие «тонких» вырубок путем разработки специального алгоритма. Такой алгоритм, основываясь на исходной бинарной маске всех вырубок, позволит формировать новую бинарную маску, содержащую лишь тонкие вырубки и исключающую остальные типы.

Предлагается алгоритм выделения тонких объектов на маске рубок. Его суть состоит в повторяющихся операциях последовательного удаления граничных пикселей каждого объекта с последующим равнозначным числом восстановительных шагов. В ходе каждой итерации восстановления утраченные пиксели возвращаются только из числа ближайших соседей. Подобный метод обеспечивает полное удаление тонких фрагментов после завершения цикла указанных процедур. Чем большее количество итераций эрозии-восстановления выполнить, чем более широкие фрагменты будут оставлены на маске.

Иллюстрация описываемых процедур представлена на рис. 3. После выполнения итераций эрозии $i_{\text{ер}} = 1, \dots, N$ производится аналогичное количество итераций восстановления $i_{\text{вос}} = 1, \dots, N$. Итоговая маска представляет собой маску тонких рубок. Зелеными стрелками отражается: при $i_{\text{вос}} = x, x \in 1, \dots, N$, используется информация о сохранившихся пикселях, зафиксированная при $i_{\text{ер}} = N - x + 1$. По завершении процесса восстановления выполняется логическое исключение («исключающее ИЛИ») между полученной выходной и первоначальной масками. Это формирует предварительную маску тонких вырубок, содержащую незначительные шумы, которые необходимо устранить. Для этого применяется этап фильтрации мелких объектов («Фильтр малых объектов»). Алгоритм эрозии, выполняемый над бинарными масками, представлен в [22].

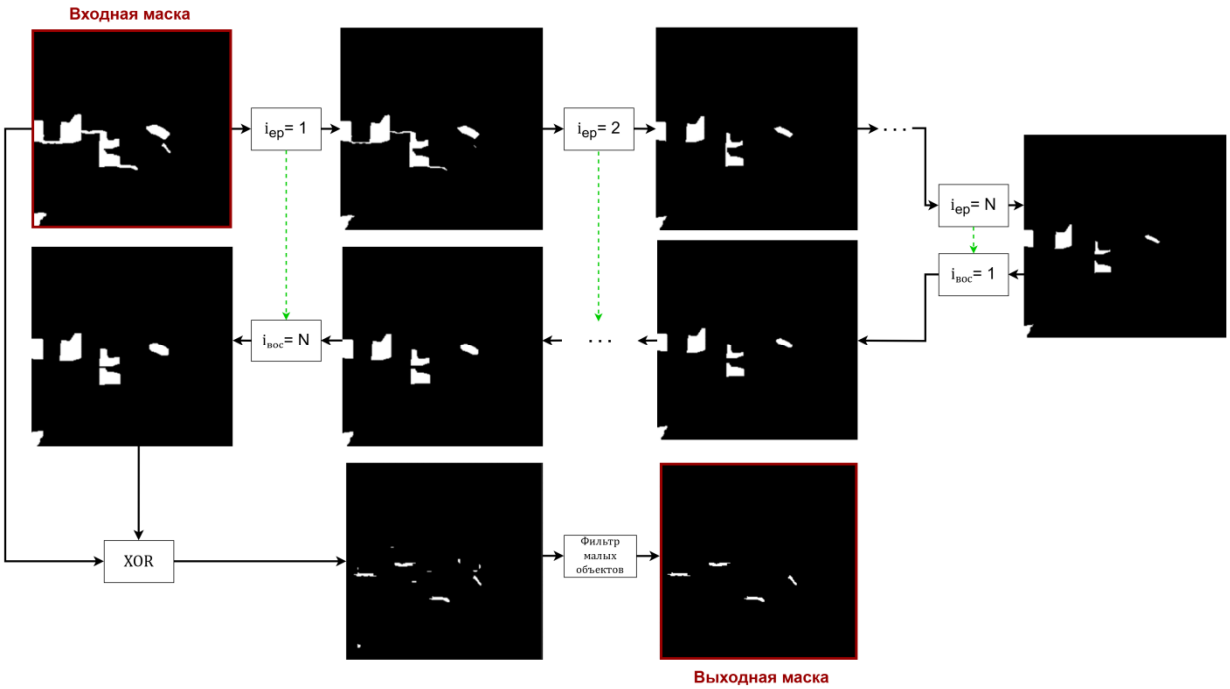


Рис. 3. Иллюстрация работы фильтра тонких фрагментов
Fig. 3. Illustration of thin fragment filter operation

Для реализации вышеописанных «мягких» «аккуратных» прогнозов предлагается следующий метод. Чтобы изменить характер ошибок прогнозирования в сторону ложноположительных ошибок, рассматривается функция потерь Tversky Loss [23]. Одна из отличительных ее особенностей – возможность повышать параметр α при понижении параметра β, за счет чего есть возможность достичь эффекта «осторожной» модели при обучении. Эффект фокусировки достигается модификацией схемы вычислений подсчета TP, FP и FN. Вводится маска приоритетов наряду с маской истинных предсказаний. Так, за более приоритетные участки модель будет больше штрафоваться за ошибку и более вознаграждаться за правильный ответ.

Положим, ширина, высота выходной и ожидаемой маски W и H соответственно. В процессе обучения подаем на вход нейросети очередное изображение из тренировочной выборки и получаем еще не бинаризированную карту прогнозов $\tilde{Y}_{\text{двухмерн}} \in [0,1]^{H \times W}$. Ожидаем от модели истинную бинарную маску $Y_{\text{двухмерн}} \in \{0,1\}^{H \times W}$. Имеем маску приоритетов $S_{\text{двухмерн}} \in R$. Далее для упрощения представления далее преобразуем $Y_{\text{двухмерн}}, \tilde{Y}_{\text{двухмерн}}, S_{\text{двухмерн}}$ в одномерный вид $Y, \tilde{Y}, S$ так, что: $Y \in \{0,1\}^M, \tilde{Y} \in [0,1]^M, M = H \cdot W$. Применяем функцию потерь в виде

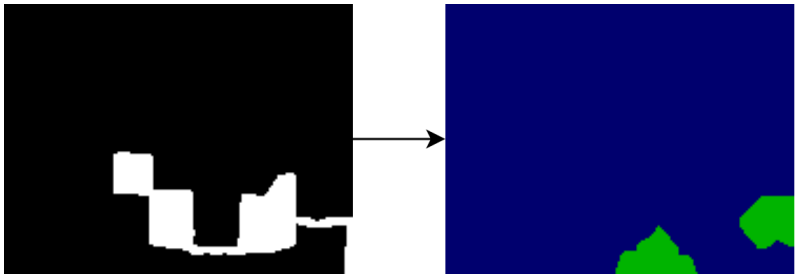
$$L_{\alpha,\beta}(Y,\tilde{Y}) = 1 - \frac{((Y\tilde{Y})S)}{Y\tilde{Y} + \alpha((1-Y)\tilde{Y})S + \beta(Y(1-\tilde{Y})S)}. \quad (1)$$

Что касается метрик оценивания, используются как стандартные, так и специализированные метрики, позволяющие оценить эффективность решения конкретно в аспекте точности распознавания лесных рубок. Представляем перечень применяемых базовых метрик:

$$Precision(Y,\tilde{Y}) = \frac{TP}{TP+FP}, \; Recall(Y,\tilde{Y}) = \frac{TP}{TP+FN},$$
$$F_1(Y,\tilde{Y}) = \frac{2 \cdot Precision(Y,\tilde{Y}) \cdot Recall(Y,\tilde{Y})}{Precision(Y,\tilde{Y}) + Recall(Y,\tilde{Y})}, \quad (2)$$

где TP – количество пикселей, которые были правильно отнесены к рубкам. FN – количество пикселей, в которых рубка была пропущена. FP – количество пикселей, которые были неправильно отнесены к рубкам.

Необходима оценка качества распознавания лесных просек («тонких» объектов в целом). Для этого в расчет $TP_{\text{тонк}}$, $FP_{\text{тонк}}$, $FN_{\text{тонк}}$ берутся лишь те пиксели масок, что входят в окрестности и пределы маски тонких рубок. Визуализация таких окрестностей представлена на рис. 4. Говорим о $F_{1\ \text{тонк}}$ и $F_{1\ \text{проч}}$ (остальная область – синяя маска), что вычисляется по аналогии $TP_{\text{проч}}$, $FP_{\text{проч}}$, $FN_{\text{проч}}$.



a) b)

Рис. 4. Иллюстрация выделения областей для подсчета $F_{1\ \text{тонк}}$ (зеленый цвет) и $F_{1\ \text{проч}}$ (синий цвет): a – исходная маска; b – соответствующие выделенные области маски
Fig. 4. Illustration of region extraction for calculating $F_{1\ \text{тонк}}$ (green color) and $F_{1\ \text{проч}}$ (blue color): a – original mask; b – corresponding extracted regions

Результаты и обсуждение

Задачи сегментации снимков для «снежного» и «бесснежного» сезонов решались раздельно, используя отдельные модели (ансамбли моделей). Процесс обучения включал фиксированное количество эпох, на каждой из которых сохраняются контрольные точки (чекпоинты). После завершения обучения среди всех сохранённых чекпоинтов выбирается та версия модели, которая демонстрирует лучшие результаты на валидационном датасете. Эта выбранная модель считается обученной и далее проверяется на тестовых данных согласно ранее описанным критериям.

Предварительная обработка данных проводилась одинаково для всех моделей и включала этапы нормализации и нарезки изображений. Исходные данные были нормализованы методом Z-нормализации, устраняющим влияние исходного масштаба на результаты моделирования. Затем изображения разрезались на отдельные кадры и балансировались. Для «бесснежного» периода обучающая выборка содержала 40 052 пары изображений, валидационная – 12 500 пар, тестовая – 5 625 пар. В случае «снежного» периода объемы составляли соответственно 49 563, 14 017 и 7 220 пар изображений. Для решения задачи «бесснежного» сезона мы используем лишь следующие каналы: B2 (голубой), B3 (зеленый), B4 (красный), B5 (VNIR), B11 и B12 (SWIR). Изображения каналов с разрешением 20 и 60 м с помощью процедуры увеличения пространственного разрешения с использованием глубокой нейронной сети DeepSentinel-2 [24] приводились к разрешению 10 м. Используем пакетный градиентный спуск с размером пакета (batch size), равным 32.

На основании предварительных экспериментов с перебором гиперпараметров для всех последующих экспериментов была выбрана архитектура Mobilenetv2-Unet++ [25] с числом параметров 6.8 M. Благодаря достаточно небольшому размеру модели и возможности параллельной обработки такие модели могут эффективно использоваться в контексте нейросетевого ансамблирования.

Результаты экспериментов по обоим сезонам приведены в таблице. Обозначения в таблице означают следующее:

– Baseline: модель архитектуры MobileNetV2_U-Net++, обученная на оригинальном наборе данных;

– Augmentation: такой же эксперимент, как Baseline, но с добавлением равного количества (50 %) искаженных кадров (смещение, поворот, отзеркаливание, вращение): половина кадра с участками лесных просек, половина – кадры без рубок (для восстановления баланса);

– Thin Thick Ensemble: предлагаемый подход, реализованный в ансамбле двух моделей MobileNetV2_U-Net++, обученных на оригинальном наборе данных;

– Thin Thick Ensemble & Augmentation: обучение вышеописанного ансамбля на аугментированном наборе данных.

Показано, что схема Thin Thick Ensemble & Augmentation дала результативность на 5,35 % больше по сравнению с Baseline по метрике $F_{1\ \text{тонк}}$. При этом не потеряли показатель $F_{1\ \text{проч}}$, что означает сохранение качества обнаруживать другие виды лесных вырубок, кроме лесных просек. Показано также, что схема Thin Thick Ensemble & Augmentation дала результативность на +6,8 % больше по сравнению с Baseline по «снежному сезону». При этом также не потеряли показатель

$F_{1\ \text{проч}}$. В обоих случаях наблюдается эффект: комбинация подхода аугментации изображения и предложенной схемы «мягкого осторожного» ансамбля дает результативность больше, чем применение этих подходов по отдельности.

Результаты экспериментов по двум сезонам
Experimental results for two seasons

Эксперимент	Сезон			
	Бесснежный		Снежный	
	$F_{1\ \text{тонк}}$	$F_{1\ \text{проч}}$	$F_{1\ \text{тонк}}$	$F_{1\ \text{проч}}$
Baseline	0,7971	0,9260	0,7640	0,8969
Augmentation	0,8362	0,9276	0,7803	**0,9015**
Thin Thick Ensemble	0,8384	0,9292	0,8225	0,8986
Thin Thick Ensemble & Augmentation	**0,8506**	**0,9296**	**0,8320**	0,9011

Приведенные выше результаты показывают, что предложенный метод позволяет значительно повысить точность распознавания лесных рубок в условиях наличия значительной доли их в виде лесных просек по сравнению с традиционными подходами.

Стоит учесть, что рассматриваемые модели не принимают во внимание лесные участки с иными характерными признаками, затрудняющими автоматическое распознавание. Облачный покров представляет собой серьезную проблему при анализе космических снимков [20], поскольку облака и их тени способны полностью или частично скрывать участки земной поверхности, препятствуя достоверному выявлению лесных рубок. Поэтому вопросы учета влияния облачности на эффективность распознавания лесных рубок на спутниковых изображениях требуют дальнейшей научной проработки.

Заключение

Предложен метод повышения эффективности распознавания лесных просек, основанный на модифицированной функции потерь TverskyLoss с использованием нейросетевого ансамблирования. Эффективность метода подтверждена экспериментально на двух наборах данных, соответствующих «снежному» и «бесснежному» сезонам. Благодаря предложенному методу удалось повысить качество распознавания лесных просек по показателю $F_{1\ \text{тонк}}$ на 5,35 % для «бесснежного сезона» и 6,8 % для «снежного сезона» без потерь в качестве распознавания рубок других категорий. Для дальнейшего повышения точности нейросетевой модели необходимы дополнительные исследования, направленные на расширение и повышение качества тренировочного набора данных посредством включения большего разнообразия примеров лесных вырубок. Представляют научный и прикладной интерес вопросы распознавания рубок на спутниковых снимках в условиях наличия отвлекающих помех, таких как лесные гари и ветровалы. Важным направлением дальнейших исследований является повышение точности обнаружения лесных рубок при влиянии неблагоприятных атмосферных условий, таких как плотная облачность (включая затененность облаками) и туманность.

Список литературы

1. Deep Learning-Driven Multi-Temporal Detection: Leveraging DeeplabV3+/ Efficientnet-B08 Semantic Segmentation for Deforestation and Forest Fire Detection / J. Soundararajan, A. Kalukin, J. Malof, D. Xu // Remote Sensing. 2025. Vol. 17, no. 14. P. 2333. DOI: 10.3390/rs17142333

2. Deforestation detection with fully convolutional networks in the Amazon Forest from Landsat-8 and Sentinel-2 images / D.L. Torres, J.N. Turnes, P.J. Soto Vega et al. // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, no. 24. P. 5084. DOI: 10.3390/rs13245084

3. John D., Zhang C. An attention-based U-Net for detecting deforestation within satellite sensor imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 107. P. 102685. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102685

4. Classification of landscape affected by deforestation using high-resolution remote sensing data and deep-learning techniques / S.-H. Lee, K.-J. Han, K. Lee et al. // Remote Sensing, 2020. Vol. 12, no. 20. P. 3372. DOI: 10.3390/rs12203372

5. Deep Learning for Regular Change Detection in Ukrainian Forest Ecosystem With Sentinel-2 / K. Isaienkov, M. Yushchuk, V. Khramtsov, O. Seliverstov // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2021. Vol. 14. P. 364–376. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3034186

6. Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks / S.H. Khan, X. He, F. Porikli, M. Bennamoun // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. Vol. 55, no. 9. P. 5407–5423. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2707528

7. de Andrade R.B., Mota G.L.A., da Costa G.A.O.P. Deforestation Detection in the Amazon Using DeepLabv3+ Semantic Segmentation Model Variants // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 19. P. 4694. DOI: 10.3390/rs14194694

8. RepDDNet: a fast and accurate deforestation detection model with highresolution remote sensing image / Z. Wang, Z. Wang, D. Yan et al. // International Journal of Digital Earth. 2023. Vol. 16, no. 1. P. 2013–2033. DOI: 10.1080/17538947.2023.2220619

9. Fodor G., Conde M.V. Rapid Deforestation and Burned Area Detection using Deep Multimodal Learning on Satellite Imagery // arXiv:2307.04916. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2307.04916

10. Модели U-Net для семантической сегментации повреждённых деревьев сосны сибирской кедровой на снимках с БПЛА / Н.Г. Марков, К.А. Маслов, И.А. Керчев, О.С. Токарева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 1. С. 65–77. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-65-77

11. A Combined Deep Learning and Prior Knowledge Constraint Approach for Large-Scale Forest Disturbance Detection Using Time Series Remote Sensing Data / B. Du, Z. Yuan, Y. Bo, Y. Zhang // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, no. 12. P. 2963. DOI: 10.3390/rs15122963

12. Comparing Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI Imagery for Monitoring Selective Logging in the Brazilian Amazon / T. Almeida Lima et al. // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, no. 8. P. 961. DOI: 10.3390/rs11080961

13. Pałaś K.W., Zawadzki J. Sentinel-2 Imagery Processing for Tree Logging Observations on the Białowieża Forest World Heritage Site // Forests. 2020. Vol. 11, no. 8. P. 857. DOI: 10.3390/f11080857

14. Near Real-Time Change Detection System Using Sentinel-2 and Machine Learning: A Test for Mexican and Colombian Forests / A.M. Pacheco-Pascagaza et al. // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 3. P. 707. DOI: 10.3390/rs14030707

15. Распознавание вырубок и ветровалов по спутниковым снимкам Sentinel-2 с применением свёрточной нейронной сети U-net и факторы, влияющие на его точность / А.И. Канев, А.В. Тарасов, А.Н. Шихов и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 3. С. 136–151. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-136-151

16. Сравнительная оценка различных архитектур сверточных нейронных сетей для семантической сегментации нарушений лесного покрова по разновременным спутниковым снимкам / Н.С. Подопригорова, А.В. Тарасов, А.Н. Шихов, А.И. Канев // Исследование Земли из космоса. 2024. № 3. Р. 3–15. DOI: 10.31857/S0205961424030013

17. Monitoring direct drivers of small-scale tropical forest disturbance in near real-time with Sentinel-1 and -2 data / B. Slagter, J. Reiche, D. Marcos et al. // Remote Sensing of Environment. 2023. Vol. 295. P. 113655. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113655

18. О классификации космических снимков Sentinel-2 нейронной сетью ResNet-50 / И.В. Бычков, Г.М. Ружников, Р.К. Федоров и др. // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 3. С. 474–481. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1216

19. Каюмов О.О., Пятаева А.В. Сегментация лесных рубок по данным спутниковых снимков на базе модели MaskFormer // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 10 (136). С. 1–8. DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.16

20. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для картографирования лесных рубок по летним космическим снимкам / А.В. Мельников, Ю.М. Полищук, М.А. Русанов и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 806–814. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-806-814

21. Sentinel Hub. Sentinel-2 L1C. URL: https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l1c/ (дата обращения: 27.05.2025).

22. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV. Sebastopol (CA): O'Reilly, 2008.

23. Gábor H. The Tversky loss function and its modifications for medical image segmentation. URL: https://math-projects.elte.hu/media/works/187/report/tversky_loss_and_variants.pdf (дата обращения 20.12.2025).

24. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network / C. Lanarasa, J. Bioucas-Dias, S. Galliania et al. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 146. P. 305–319. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.018

25. Python library with Neural Networks for Image Semantic Segmentation based on PyTorch. URL: https://github.com/qubvel-org/segmentation_models.pytorch?tab=readme-ov-file (дата обращения: 27.05.2025).

References

1. Soundararajan J., Kalukin A., Malof J., Xu D. Deep Learning-Driven Multi-Temporal Detection: Leveraging DeeplabV3+/ Efficientnet-B08 Semantic Segmentation for Deforestation and Forest Fire Detection. *Remote Sensing*. 2025;17(14):2333. DOI: 10.3390/rs17142333

2. Torres D.L., Turnes J.N., Soto Vega P.J., Feitosa R.Q., Silva D.E., Marcato Junior J., Almeida C. Deforestation detection with fully convolutional networks in the Amazon Forest from Landsat-8 and Sentinel-2 images. *Remote Sensing*. 2021;13(24):5084. DOI: 10.3390/rs13245084

3. John D., Zhang C. An attention-based U-Net for detecting deforestation within satellite sensor imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022;107:102685. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102685

4. Lee S.-H., Han K.-J., Lee K., Lee K.-J., Oh K.-Y., Lee M.-J. Classification of landscape affected by deforestation using high-resolution remote sensing data and deep-learning techniques. *Remote Sensing*. 2020;12(20):3372. DOI: 10.3390/rs12203372

5. Isaienkov K., Yushchuk M., Khramtsov V., Seliverstov O. Deep Learning for Regular Change Detection in Ukrainian Forest Ecosystem With Sentinel-2. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2021;14:364–376. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3034186

6. Khan S.H., He X., Porikli F., Bennamoun M. Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017;55(9):5407–5423. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2707528

7. de Andrade R.B., Mota G.L.A., da Costa G.A.O.P. Deforestation Detection in the Amazon Using DeepLabv3+ Semantic Segmentation Model Variants. *Remote Sensing*. 2022;14(19):4694. DOI: 10.3390/rs14194694

8. Wang Z., Wang Z., Yan D., Mo Z., Zhang H., Zhang Q. RepDDNet: a fast and accurate deforestation detection model with highresolution remote sensing image. *International Journal of Digital Earth*. 2023;16(1):2013–2033. DOI: 10.1080/17538947.2023.2220619

9. Fodor G., Conde M.V. Rapid Deforestation and Burned Area Detection using Deep Multimodal Learning on Satellite Imagery. *arXiv:2307.04916*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2307.04916

10. Markov N.G., Maslov K.A., Kerchev I.A., Tokareva O.S. U-Net models for semantic segmentation of damaged *Pinus sibirica* trees in UAV imagery. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022;19(1):65–77. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-65-77

11. Du B., Yuan Z., Bo Y., Zhang Y. A Combined Deep Learning and Prior Knowledge Constraint Approach for Large-Scale Forest Disturbance Detection Using Time Series Remote Sensing Data. *Remote Sensing*. 2023;15(12):2963. DOI: 10.3390/rs15122963

12. Almeida Lima T. et al. Comparing Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI Imagery for Monitoring Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*. 2019;11(8):961. DOI: 10.3390/rs11080961

13. Pałaś K.W., Zawadzki J. Sentinel-2 Imagery Processing for Tree Logging Observations on the Białowieża Forest World Heritage Site. *Forests*. 2020;11(8):857. DOI: 10.3390/f11080857

14. Pacheco-Pascagaza A.M. et al. Near Real-Time Change Detection System Using Sentinel-2 and Machine Learning: A Test for Mexican and Colombian Forests. *Remote Sensing*. 2022;14(3):707. DOI: 10.3390/rs14030707

15. Kanev A.I., Tarasov A.V., Shikhov A.N., Podoprigorova N.S., Safonov F.A. Identification of logged and windthrow areas from Sentinel-2 satellite images using the U-net convolutional neural network and factors affecting its accuracy. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023;20(3):136–151. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-136-151

16. Podoprigorova N.S., Tarasov A.V., Shikhov A.N., Kanev A.I. Comparative Assessment of Different Architectures of Convolutional Neural Network for Semantic Segmentation of Forest Disturbances from Multi-Temporal Satellite Images. *Earth Research from Space*. 2024;(3):3–15. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0205961424030013

17. Slagter B., Reiche J., Marcos D., Mullissa A., Lossou E., Pena-Claros M., Herold M. Monitoring direct drivers of small-scale tropical forest disturbance in near real-time with Sentinel-1 and -2 data. *Remote Sensing of Environment*. 2023;295:113655. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113655

18. Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K., Avramenko Y.V. On classification of Sentinel-2 satellite images by a neural network ResNet-50. *Computer Optics*. 2023;47(3):474–481. (In Russ.)

19. Qayumov O.O., Pyataeva A.V. Forest cutting segmentation from satellite image data based on MaskFormer model. *International Research Journal*. 2023;10(136):1–8. (In Russ.) DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.16

20. Melnikov A.V., Polishchuk Yu.M., Rusanov M.A., Abbazov V.R., Kochergin G.A., Kupriyanov M.A., Baisalyamova O.A., Sokolkov O.I. Comparative analysis of neural network models for felling mapping in summer satellite imagery. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2024;24(5):806–814. (In Russ.) DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-806-814

21. Sentinel Hub. Sentinel-2 L1C. Available at: https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l1c/ (accessed 27.05.2025)

22. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV*. Sebastopol (CA): O'Reilly, 2008.

23. Gábor H. The Tversky loss function and its modifications for medical image segmentation. Available at: https://math-projects.elte.hu/media/works/187/report/tversky_loss_and_variants.pdf (accessed 20.12.2025)

24. Lanarasa C., Bioucas-Dias J., Galliania S., Baltsaviasa E., Schindlera K. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018;146:305–319. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.018

25. Python library with Neural Networks for Image Semantic Segmentation based on PyTorch. Available at: https://github.com/qubvel-org/segmentation_models.pytorch?tab=readme-ov-file (accessed 27.05.2025).

Информация об авторе

Соколков Олег Игоревич, ведущий программист Центра развития искусственного интеллекта, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; аспирант Инженерной школы цифровых технологий, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; sokolkovoi@uriit.ru.

Information about the author

Oleg I. Sokolkov, Lead Programmer of the Center of AI Development, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; Postgraduate Student of the Engineering School of Digital Technologies, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; sokolkovoi@uriit.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 21.12.2025
The article was submitted 21.12.2025

Управление в технических системах
Control in technical systems

Научная статья
УДК 621.785:535.211
DOI: 10.14529/ctcr260103

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ЕЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

И.М. Ячиков, *iachikovim@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-1562-7506*
Е.А. Шаталов, *schatalovegor@yandex.ru*
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Нестабильность результатов лазерной закалки обуславливает необходимость комплексного анализа методов расчета температурного поля для оптимизации процесса и повышения точности прогнозирования глубины закаленного слоя. **Цель:** проведение сравнительного анализа точности основных аналитических методов расчета температурного поля металлической пластины при поверхностной лазерной закалке для прогнозирования глубины закаленного слоя. Исследование направлено на выявление наиболее адекватного аналитического подхода путем сопоставления с результатами численного моделирования. **Материалы и методы.** В качестве объектов сравнения выбраны три распространенных аналитических метода: решение дифференциальных уравнений теплопроводности с использованием преобразования Лапласа; модель на основе функций Грина для движущегося гауссова источника тепла; метод, основанный на модифицированном уравнении Розенталя для точечного источника тепла. Точность методов оценивалась по критерию прогнозирования глубины зоны закалки при фиксированной температуре ($T_z \approx 820$ °C для стали 40Х). В качестве эталона использованы результаты численного моделирования, выполненные с помощью авторской компьютерной программы Laser_hardening_of_metal. Расчеты проведены для пластины из стали 40Х при мощности лазера 2000 Вт, скорости сканирования 10 мм/с и радиусе пятна 4,5 мм. **Результаты.** Установлено, что аналитические методы дают различную оценку глубины закаленного слоя ≈ 1,3 мм (метод Лапласа), ≈ 0,6 мм (метод Грина), ≈ 0,8 мм (метод Розенталя). Численное моделирование показало значение, равное 0,822 мм. Наиболее близкий к численному результату продемонстрировал метод, основанный на решении уравнения теплопроводности с использованием функций Грина для движущегося гауссова источника. Метод на основе модификации уравнения Розенталя получил расхождение с численной моделью около 25 %, а решение с преобразованием Лапласа показало наибольшую погрешность (более 50 %), подтвердив его исключительно оценочный характер. **Заключение.** Сравнительный анализ позволил ранжировать аналитические методы по точности прогноза глубины лазерной закалки. Для инженерных расчетов, требующих высокой точности и наличия вычислительных средств, рекомендован метод на основе функций Грина. Для оперативных приближенных оценок с приемлемой погрешностью (порядка 20–25 %) может применяться модифицированное уравнение Розенталя. Результаты работы обеспечивают рациональную основу для выбора метода расчета и оптимизации параметров лазерной поверхностной термообработки.

Ключевые слова: сравнительный анализ методов, поверхностная лазерная закалка, математическая модель теплового состояния пластины, компьютерная модель теплового состояния пластины

Для цитирования: Ячиков И.М., Шаталов Е.А. Анализ методов расчета температурного поля металлической пластины при ее поверхностной лазерной закалке // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 33–42. DOI: 10.14529/ctcr260103

© Ячиков И.М., Шаталов Е.А., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260103

ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELD CALCULATION METHODS FOR A METAL PLATE DURING SURFACE LASER HARDENING

***I.M. Yachikov**, iachikovim@susu.ru, https://orcid.org/0000-0002-1562-7506*
***E.A. Shatalov**, schatalovegor@yandex.ru*
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The instability of laser hardening results necessitates a comprehensive analysis of methods for calculating the temperature field to optimize the process and improve the accuracy of predicting the depth of the hardened layer. **Purpose.** Conducting a comparative analysis of the accuracy of the main analytical methods for calculating the temperature field of a metal plate during surface laser hardening to predict the depth of the hardened layer. The study aims to identify the most adequate analytical approach by comparing it with the results of numerical modeling. **Materials and Methods.** Three common analytical methods were selected for comparison: solving differential heat conduction equations using the Laplace transform; a model based on Green's functions for a moving Gaussian heat source; and a method based on a modified Rosenthal equation for a point heat source. The accuracy of the methods was assessed by the criterion of predicting the hardening zone depth at a fixed temperature ($T_z \approx 820$ °C for 40Kh steel). The results of numerical modeling performed using the author's computer program "Laser_hardening_of_metal" were used as a benchmark. Calculations were performed for a 40Kh steel plate at a laser power of 2000 W, a scanning speed of 10 mm/s, and a beam radius of 4.5 mm. **Results.** It was established that the analytical methods provide different estimates of the hardened layer depth: ≈ 1.3 mm (Laplace method), ≈ 0.6 mm (Green's function method), ≈ 0.8 mm (Rosenthal method). Numerical modeling yielded a value of 0.822 mm. The method based on solving the heat conduction equation using Green's functions for a moving Gaussian source showed the closest agreement with the numerical result. The method based on the modified Rosenthal equation showed a discrepancy with the numerical model of about 25 %, while the solution using the Laplace transform demonstrated the highest error (over 50 %), confirming its exclusively estimative nature. **Conclusion.** The comparative analysis allowed ranking the analytical methods by the accuracy of laser hardening depth prediction. For engineering calculations requiring high accuracy and computational resources, the method based on Green's functions is recommended. For rapid approximate estimates with acceptable error (about 20–25 %), the modified Rosenthal equation can be applied. The results of the work provide a rational basis for selecting a calculation method and optimizing the parameters of laser surface heat treatment.

Keywords: comparative analysis of methods, surface laser hardening, mathematical modeling of plate thermal state, computational modeling of plate thermal state

For citation: Yachikov I.M., Shatalov E.A. Analysis of temperature field calculation methods for a metal plate during surface laser hardening. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):33–42. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260103

Введение

В настоящий момент экспериментальные исследования показывают, что процесс лазерной закалки металлических поверхностей не во всех случаях обеспечивает ожидаемые положительные результаты из-за существующего множества различных факторов, влияющих на процесс. Существующие математические модели по определению теплового состояния металлической поверхности при воздействии на нее лазерного луча не всегда дают адекватное представление из-за необходимости использования различных допущений. Это обусловливает необходимость проведения комплексного анализа и сравнительной оценки существующих методов расчета как численных, так и аналитических для рационального выбора параметров обработки для повышения точности прогнозирования глубины закаливаемого слоя.

В зарубежной и отечественной литературе предложено огромное множество интерпретаций аналитического расчета температурного поля при поверхностной лазерной термообработке металла. Однако большая их часть базируется на нескольких основных методах расчета.

Одним из наиболее распространенных является решение дифференциальных уравнений теплопроводности с использованием преобразования Лапласа. Данный метод в большей части литературы указывается как оценочный с невысокой точностью вычислений [1–6].

Менее распространенным методом выступает модель на основе решения дифференциальных уравнений теплопроводности методом функций Грина [7–9]. Стоит отметить, что основным недостатком получаемой математической модели является трудоемкость вычислений без использования ЭВМ.

В зарубежной литературе широко распространено использование аналитического метода, связанного с решением уравнения Розенталя для точечного источника тепла [10, 11].

Существующее многообразие аналитических моделей учитывает или не учитывает движение луча по поверхности металла, определяет одномерное, двухмерное или трехмерное температурное поле, имеет разную сложность и точность. Все это приводит к проблеме выбора необходимого метода решения для конкретного используемого оборудования и обрабатываемого металла при поверхностной лазерной закалке. Прежде всего, потому что каждый из данных методов имеет свои преимущества и недостатки. В одних случаях – это сложность вычислений, в других – неточность получаемых результатов.

Целью работы является проведение сравнительного анализа точности при лазерной термообработке металла для основных существующих аналитических методов расчета при их сравнении с численным методом прогнозирования глубины закаливаемого слоя.

1. Анализ существующих аналитических методов расчета теплового состояния металлической пластины при ее поверхностной лазерной закалке

Рассмотрим процесс движения лазера по поверхности металла со скоростью луча лазера v и радиусом пятна на поверхности металла r (рис. 1).

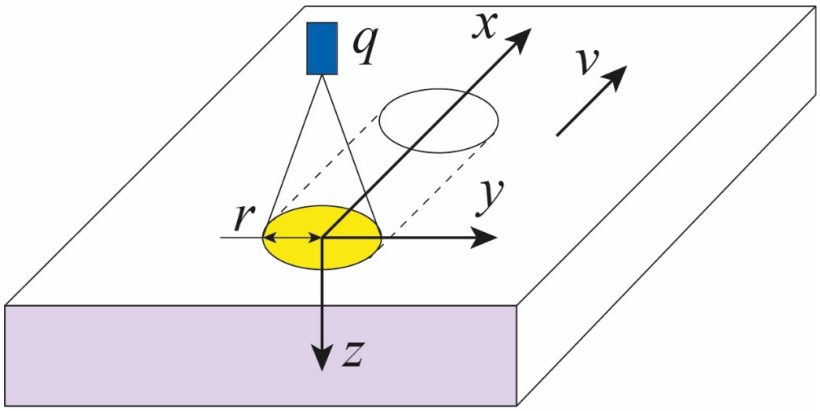


Рис. 1. Процесс движения лазерного луча при нагреве стальной заготовки
Fig. 1. Process of laser beam motion during heating of steel billet

Проведем сравнительный анализ трех основных существующих аналитических способов решения задачи нагрева полубесконечного стального образца лазерным лучом.

Для выполнения расчетов были систематизированы данные о теплофизических свойствах стали марки 40Х. На основе табличных значений теплофизических свойств этой стали, представленных в работе [12], получены аппроксимирующие уравнения плотности, удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности от температуры и рассчитаны их среднеинтегральные значения в диапазоне температур $20 \le t \le 1100$ °С:

$\rho_{\text{т}}(t) = 7830 - 0{,}283 \cdot t - 3{,}23 \cdot 10^{-5} t^2$, ρ = 7658 кг/м^3;

$C_{\text{т}}(t) = 432 + 0{,}371 \cdot t - 1{,}05 \cdot 10^{-4} t^2$, C = 597 Дж/(кг·К);

$\lambda_{\text{т}}(t) = 45{,}8 + 5{,}12 \cdot 10^{-3} \cdot t - 8{,}19 \cdot 10^{-5} t^2 + 5{,}79 \cdot 10^{-8} t^3$, λ = 34,6 Вт/(м·К).

Также определено среднее значение коэффициента температуропроводности в указанном диапазоне температур $a = \lambda / (C \cdot \rho) \approx 7{,}56 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Все сравнительные расчеты проводились при следующих параметрах обработки металла: мощность лазера $q = 2000$ Вт; скорость движения лазерного луча по поверхности металла $v = 10$ мм/с; радиус пятна лазера на поверхности металла $r = 4{,}5$ мм; поглощательная способность металлической поверхности $A = 0{,}79$ и начальная температура образца, $T_0 = 29$ °C (см. рис. 1).

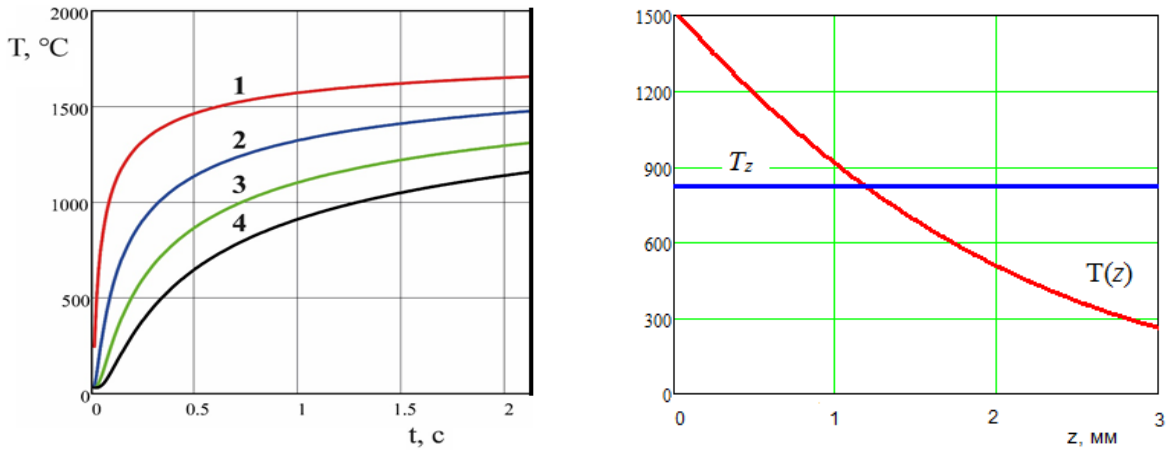
Будем выбирать температуру закалки на заданной глубине Δz по формуле $T_z = A_{c3} + \Delta t_p$, где перегрев от критической температуры A_{c3} составляет $\Delta t_p = 30$–50 °C. Для стали 40Х температура $A_{c3} = 782$ °C. Отсюда температура закалки должна составлять $T_z \approx 820$ °C.

Рассмотрим самый простой и широко распространенный способ, основанный на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности при воздействии теплового потока на полубесконечную пластину с помощью преобразования Лапласа [13]. При среднем тепловом потоке $q/(\pi \cdot r^2)$ температурное поле под фокальным неподвижным пятном будет иметь вид [1]

$$T(z,t) = T_0 + \frac{2A \cdot q \cdot (a \cdot t)^{\frac{1}{2}}}{\pi \cdot \lambda \cdot r^2} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2 \cdot (a \cdot t)^{\frac{1}{2}}}\right), \tag{1}$$

где $ierfc(x)$ – функция Лапласа или интеграл ошибок [2].

На рис. 2а представлены зависимости температуры от времени при различных расстояниях z от поверхности пластины.



a) b)

Рис. 2. Зависимости температуры от времени, рассчитанные по формуле (1) в разных точках по глубине от поверхности пластины (а) и зависимость температуры от расстояния от поверхности пластины в момент времени t_1 (b): 1 – z = 0,5 мм; 2 – z = 1 мм; 3 – z = 1,5 мм; 4 – z = 2 мм

Fig. 2. Temperature dependences on time calculated by formula (1) at different points in depth from the plate surface (a) and temperature dependence on distance from the plate surface at the moment of time t_1 (b): 1 – z = 0,5 mm; 2 – z = 1 mm; 3 – z = 1,5 mm; 4 – z = 2 mm

При движении луча по поверхности со скоростью v время воздействия q для конкретной точки может быть приближенно оценено как $t_1 = r/v \approx 0{,}45$ с. На рис. 2b показано распределение температуры по z в конце нагрева в момент времени t_1. Видно, что глубина, где достигается температура закалки T_z, при заданных параметрах составляет примерно $z_z = 1{,}3$ мм.

Понятно, что формула (1) имеет исключительно оценочный характер, так как не учитывает всего многообразия процесса: движение пятна лазера, распространение тепла по материалу в горизонтальных направлениях, плавление металла, его охлаждение и пр.

Рассмотрим следующий способ аналитического решения уравнения теплопроводности для задачи нагрева полубесконечного тела гауссовым источником тепла, движущимся по поверхности вдоль оси x со скоростью v. Если принять, что коэффициенты температуропроводности и теплопроводности a и λ соответственно не зависят от температуры, то, используя метод функций Грина для Гауссова распределения интенсивности источника тепла, можно получить значение максимальной температуры в виде интеграла [9]:

$$T(x,y,z)=T_0+\frac{A\cdot q\cdot\sqrt{a}}{\pi^{\frac{3}{2}}\cdot\lambda}\int_0^{\infty}\frac{e^{-\frac{(x+v\cdot t)^2+y^2}{4\cdot a\cdot t+r^2}-\frac{z^2}{4\cdot a\cdot t}}}{\sqrt{\tau}(4\cdot a\cdot t+r^2)}d\tau. \quad (2)$$

Обозначение выбранной системы координат показано на рис. 1. Проведем расчеты при $x = y = 0$. На рис. 3 показано распределение максимальной температуры по глубине z от поверхности пластины при разных скоростях движения луча. Видно, что глубина, где достигается температура закалки T_z, увеличивается при уменьшении скорости движения луча и при $v = 10$ мм/с составляет примерно $z_z = 0{,}6$ мм.

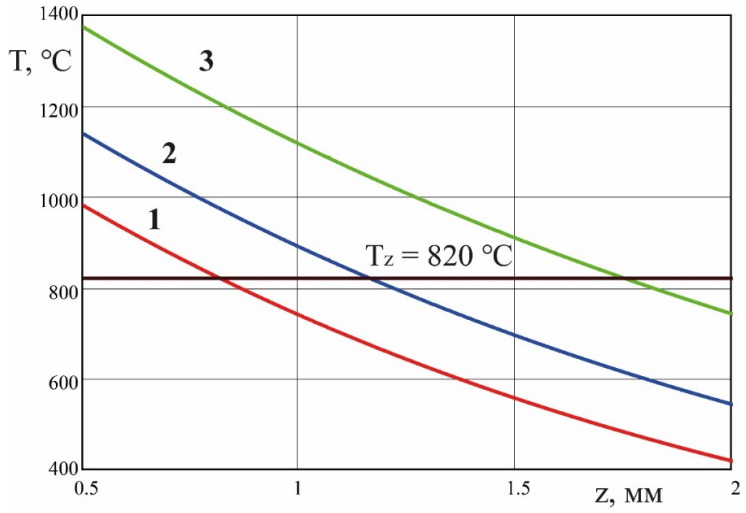


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры по глубине от поверхности пластины, рассчитанные по формуле (2) при скорости движения луча: 1 – *v* = 10 мм/с; 2 – *v* = 7,5 мм/с; 3 – *v* = 5 мм/с

Fig. 3. Dependences of the maximum temperature by depth from the plate surface calculated by formula (2) at the beam speed: 1 – *v* = 10 mm/s; 2 – *v* = 7,5 mm/s; 3 – *v* = 5 mm/s

Рассмотрим расчет температурного поля, полученный на основе уравнения для движущегося источника с гауссовым распределением энергии по толстой пластине в направлении x. Температурное поле, вызванное точечным источником, можно записать как уравнение Розенталя [14]

$$T(x,\ r)=T_0+\frac{A\cdot q}{2\pi\cdot r\cdot\lambda}\exp\left(-\frac{v(x+r)}{2a}\right).$$

Если скорость v лазерного луча высока, то его тепловое воздействие можно рассматривать как линейный источник, имеющий конечную ширину в направлении y, но бесконечно тонкий в направлении x. В этом случае распределение температур от времени t по двум координатам z и y можно рассматривать как модификацию уравнения Розенталя [10]:

$$T(z,y,t)=T_0+\frac{A\cdot q}{2\pi\cdot v\cdot\lambda\cdot(t\cdot(t+t_0))^{\frac{1}{2}}}\exp\left(\frac{-\left(\frac{(z+z_0)^2}{t}+\frac{y^2}{(t+t_0)}\right)}{4a}\right), \quad (3)$$

где $t_0=\frac{r^2}{4a}$ – время, необходимое для рассеивания тепла на половине радиуса пятна; коэффициент $z_0=\left(\frac{\pi}{2\cdot e}\left(\frac{a\cdot r}{C_1\cdot v}\right)\right)^{\frac{1}{2}}$; C_1 – постоянная, определяющая время ввода $t_в=C_1\frac{r}{v}$ тепловой энергии в заданную точку поверхности; $C_1\approx 1$.

Для задачи закалки из уравнения (3) определяется глубина z_z, где достигается заданная температура T_z:

$$z_z = \left(\frac{2}{e \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{A \cdot (q/v)}{\rho C_p \cdot (T_z - T_0)}\right)^{\frac{1}{2}} - z_0 . \quad (4)$$

На рис. 4 приведены расчетные зависимости температуры от времени на оси луча ($y = 0$) на разном расстоянии от поверхности пластины. С увеличением расстояния z максимум температур наблюдается с увеличивающимся временным лагом.

На рис. 5 приведена зависимость глубины достижения температуры закалки T_z от мощности лазера при разной скорости движения луча по поверхности металла. Видно, что чем меньше скорость и больше мощность, тем выше глубина закалки. Правда, данная модель не учитывает расплавление поверхности металла, что, естественно, не всегда допустимо при проведении закалки.

Из рис. 5 видно, что глубина, где достигается температура закалки T_z, при $v = 10$ мм/с и $q = 2000$ Вт составляет примерно $z_z = 0{,}8$ мм.

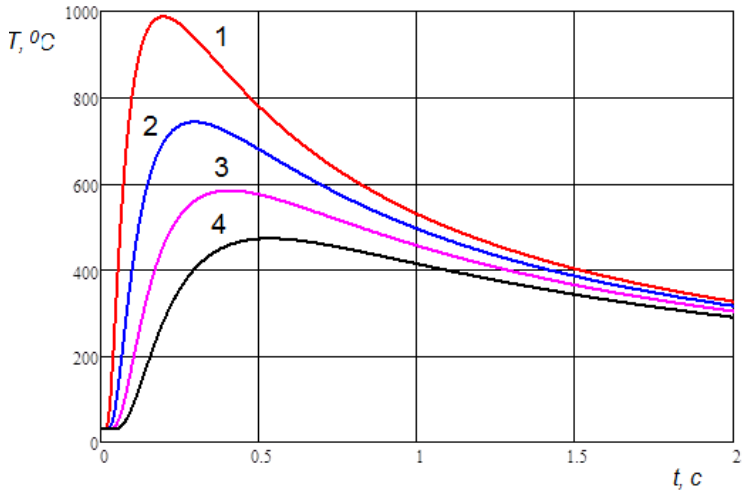


Рис. 4. Зависимости температуры от времени, полученные по формуле (3) при $y = 0$ на разном растоянии от поверхности пластины: 1 – $z = 0{,}5$ мм; 2 – $z = 1$ мм; 3 –$z = 1{,}5$ мм; 4– $z = 2$ мм
Fig. 4. Time dependences of temperature obtained by formula (3) at $y = 0$ at different distances from the plate surface: 1– $z = 0{,}5$ mm; 2 – $z = 1$ mm; 3 –$z = 1{,}5$ mm; 4 – $z = 2$ mm

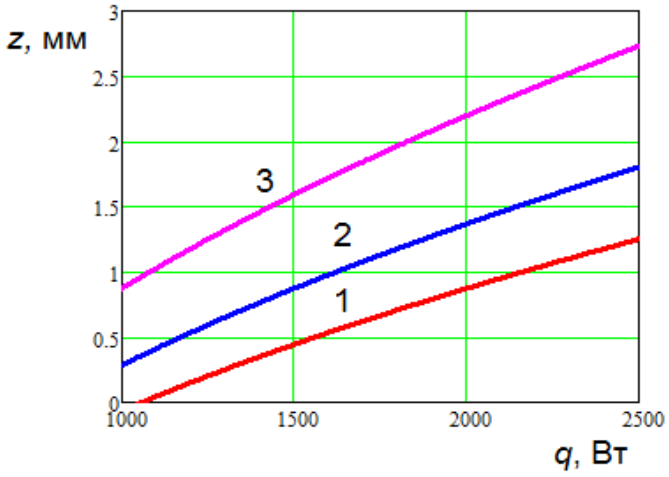
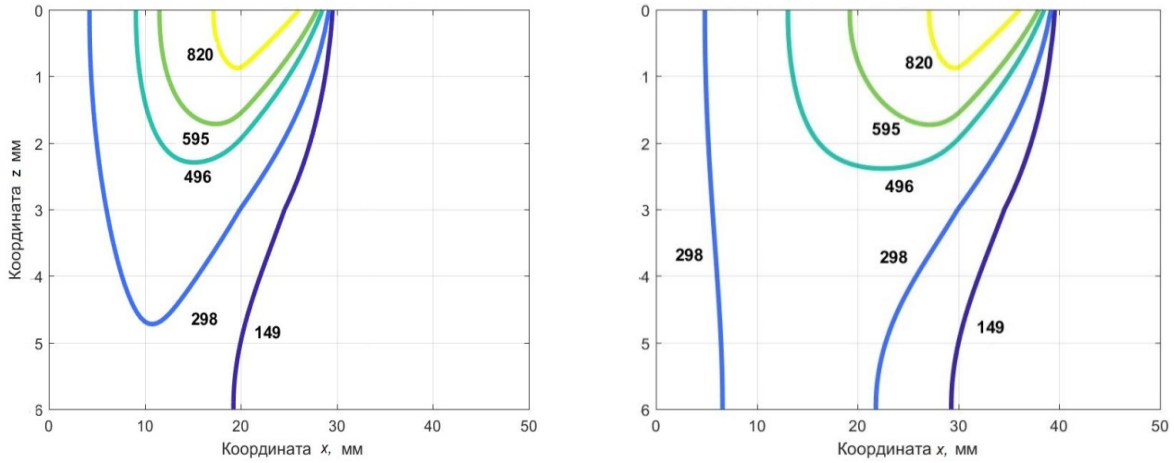


Рис. 5. Зависимость глубины достижения температуры закалки T_z от мощности лазера при скорости движения луча: 1 – $v = 10$ мм/с; 2 – $v = 7{,}5$ мм/с; 3 – $v = 5$ мм/с
Fig. 5. Dependence of the depth of reaching the quenching temperature T_z on the laser power at the beam speed: 1 – $v = 10$ mm/s; 2 – $v = 7{,}5$ mm/s; 3 – $v = 5$ mm/s

2. Расчет теплового состояния металлической пластины при ее поверхностной лазерной закалке численным методом и сравнение с аналитическими методами

В работе [15] на основе допущений и ограничений сформулирована математическая модель, представляющая собой краевую задачу расчета нестационарного теплового состояния металлической пластины и определение глубины ее прогрева и возможного проплавления при движении лазерного луча по ее поверхности. Предложен численный алгоритм и компьютерная программа *Laser_hardening_of_metal*, которая позволяет определять нестационарное распределение температур и глубину закаленного слоя.

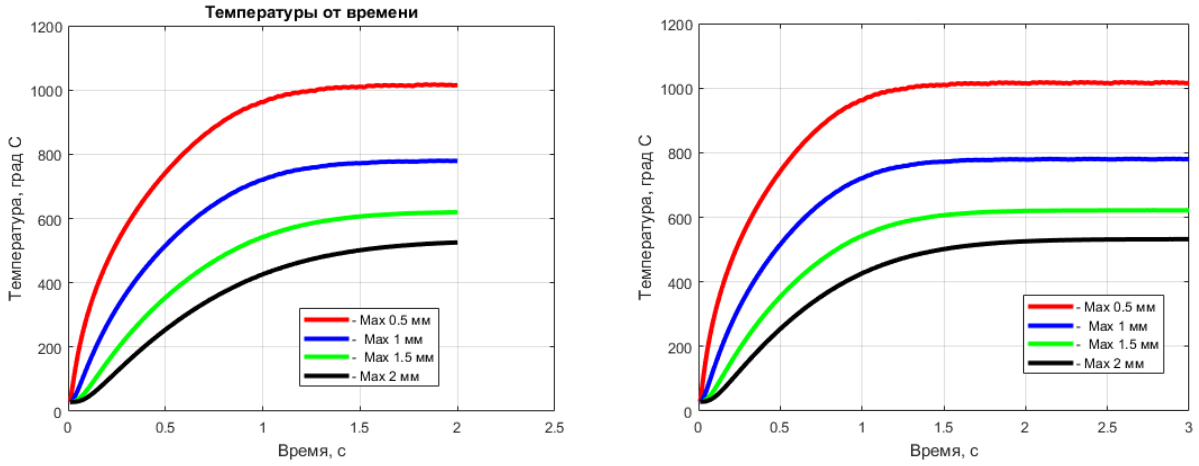
На основе компьютерного моделирования проведен расчет для пластины длиной $L = 50$ мм и толщиной $H = 6$ мм из стали марки 40Х. На рис. 6 показана диаграмма распределения температур в пластине в разные моменты времени от начала прохода луча лазера вдоль оси Ox. Также по расчетам приведены максимальные температуры от времени на разной глубине от поверхности пластины (рис. 7).



a) b)

Рис. 6. Распределение температур в пластине при движении луча лазера: a – в момент времени 2 с от начала движения, координата центра фокального пятна 24,5 мм; b – в момент времени 3 с от начала движения, координата центра фокального пятна 34,5 мм. Цифрами обозначены температуры изотерм. Температура T_z = 820 °C соответствует температуре закалки

Fig. 6. Temperature distribution in the plate during the laser beam motion: a – at the moment of time 2 s from the beginning of motion, the focal spot center coordinate is 24.5 mm; b – at the moment of time 3 s from the beginning of motion, the focal spot center coordinate is 34.5 mm. Numbers indicate isotherm temperatures. The temperature of T_z = 820 °C corresponds to the quenching temperature



a) b)

Рис. 7. Максимальные температуры от времени на разной глубине от поверхности пластины: a – по результатам расчета, показанного на рис. 6a; b – по результатам расчета на рис. 6b

Fig. 7. Maximum temperatures from time at different depths from the plate surface: a – according to the results of the calculation shown in Fig. 6a; b – according to the results of the calculation in Fig. 6b

В качестве сравнения на рис. 8 представлены зависимости температурного поля в пластине, полученные по двум аналитическим моделям и численному методу расчета.

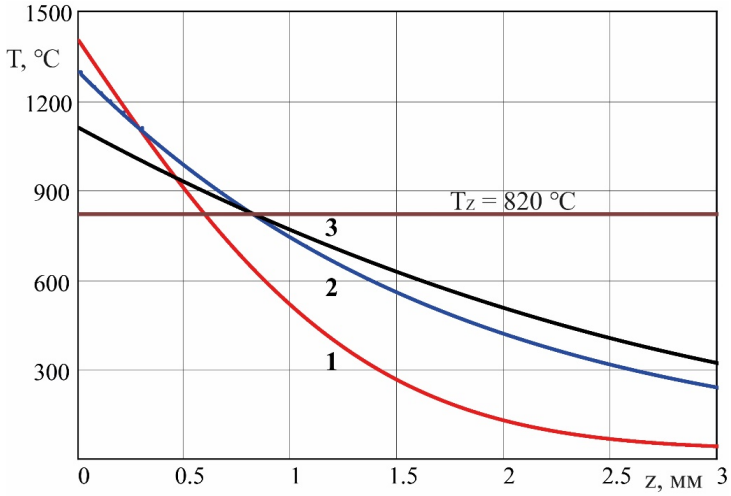


Рис. 8. Зависимости распределения максимальной температуры по глубине от поверхности пластины при лазерной термообработке металла для аналитических и численого способов расчета: 1 – по формуле (3); 2 – по формуле (2); 3 – численный метод расчета
Fig. 8. Dependencies of the distribution of the maximum temperature by depth from the surface of the plate during laser heat treatment of metal for analytical and numerical calculation methods: 1 – formula (3); 2 – formula (2); 3 – numerical solution

На основе проведенного моделирования получено, что для температуры закалки $T_z \approx 820$ °C следующие значения глубины упрочненного слоя: для метода расчета на основе уравнения для движущегося источника (3) – 0,620 мм; для расчета на основе решения уравнения теплопроводности методом функций Грина (2) – 0,816 мм; для численного метода расчета – $z_z = 0{,}822$ мм.

Заключение

Таким образом, проведен сравнительный анализ точности прогнозирования глубины закаливаемого слоя для существующих аналитических методов расчета при лазерной термообработке металла. При сравнении их с численным расчетом наиболее близкий к нему результат показал метод, полученный по формуле на основе решения уравнения теплопроводности методом функций Грина при движении источника тепла, имеющего Гауссово распределение интенсивности. Этот метод можно рекомендовать при необходимости точного расчета теплового поля и при наличии ЭВМ. Если требуется найти приближенное решение без использования сложных вычислений с получаемой точностью около 20 %, то можно использовать вариант расчета по формуле, являющейся модификацией уравнения Розенталя.

Список литературы

1. Лосев В.Ф., Морозова Е.Ю., Ципилев В.П. Физические основы лазерной обработки материалов: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. 199 с. ISBN 978-5-4387-0052-4. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: https://e.lanbook.com/book/10277 (дата обращения: 22.02.2025). Режим доступа: для авторизир. пользователей.

2. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). В 3 ч. Ч. II: Лазерный нагрев и разрушение материалов: учеб. пособие / под общ. ред. В.П. Вейко. СПб: Изд-во НИУ ИТМО, 2014. 181 с.

3. Верещагин М.Н., Целуева С.Н., Целуев М.Ю. Модифицирование поверхностных слоев высокоэнергетической обработкой // Литьё и металлургия. 2019. № 2. С. 109–116. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-109-116

4. Гуреев Г.Д., Гуреев Д.М. К вопросу о прогнозировании глубины зоны лазерной закалки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2008. № 2 (17). С. 271-274. DOI: 10.14498/vsgtu638

5. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учеб. пособие. Томск: ООО «СТТ», 2016. 92 с.

6. Meijer J., van Sprang I. Optimization of Laser Beam Transformation Hardening by One Single Parameter. *CIRP annals: manufacturing technology*. 1991. Vol. *40*, iss. 1. P. 183–186. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61963-5

7. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.

8. Рыкалин Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке. М: Машгиз, 1951. 296 с.

9. Манако В.В., Путилин В.А. Аналитическое решение задачи нагрева образца движущимся лучом лазера // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2009. № 1 (18). С. 206–213. DOI: 10.14498/vsgtu664

10. Ashby M.F., Easterling K.E. The Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beams – I. Hypo-Eutectoid Steels // Acta Metallurgica. 1984. Vol. 32, no. 11. P. 1935–1948. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90175-5

11. Babu P.D., Balamurugan K.R., Buvanashekaran G. Laser Surface Hardening: A Review // International Journal of Surface Science and Engineering. 2011. Vol. 5, no. 2/3. P. 131–151. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2011.041398

12. Стали и сплавы. Марочник: справ. / под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. М.: Интермет инжиниринг, 2001. 608 с.

13. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

14. Rosenthal D. The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments // Transactions of the ASME. 1946. Vol. 68. P. 849–866.

15. Naprimerova E., Yachikov I., Latifulina Yu. et al. Mathematical Modeling of Non-Stationary Thermal State of Processed Metal during Its Laser Hardening // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2025. Vol. 60, no. 1. P. 121–129. DOI: 10.59957/jctm.v60.i1.2025.12

References

1. Losev V.F., Morozova E.Yu., Tsipilev V.P. *Fizicheskie osnovy lazernoy obrabotki materialov: ucheb. posobie* [Physical fundamentals of laser processing of materials. Textbook]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2011. 199 p. (In Russ.) ISBN 978-5-4387-0052-4.

2. Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina G.D. *Vzaimodeystvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom (silovaya optika). V 3 ch. Ch. II: Lazernyy nagrev i razrushenie materialov: ucheb. posobie* [Interaction of Laser Radiation with Matter (Power Optics). In 3 parts. Part II. Laser Heating and Destruction of Materials]. Ed. by V.P. Veyko. St. Petersburg: ITMO Univ. Publ., 2014. 181 p. (In Russ.)

3. Vereschagin M.N., Tselueva S.N., Tseluev M.Yu. Modification of surface layers by high energy treatment. *Foundry production and metallurgy*. 2019;(2):109–116. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-109-116

4. Gureev G.D., Gureev D.M. To the question of laser hardening zone depth forecast. *Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2008;2(17):271–274. (In Russ.) DOI: 10.14498/vsgtu638

5. Kraynov A.Yu., Minkov L.L. *Chislennye metody resheniya zadach teplo- i massoperenosa: ucheb. posobie* [Numerical Methods for Solving Heat and Mass Transfer Problems. Textbook]. Tomsk: STT LLC, 2016. 92 p. (In Russ.)

6. Meijer J., van Sprang I. Optimization of Laser Beam Transformation Hardening by One Single Parameter. *CIRP annals: manufacturing technology*. 1991;*40*(1):183–186. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61963-5

7. Vedenov A.A., Gladush G.G. *Fizicheskie protsessy pri lazernoy obrabotke materialov* [Physical Processes in Laser Material Processing]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 208 p. (In Russ.)

8. Rykalin N.N. *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of Thermal Processes in Welding]. Moscow: Mashgiz Publ., 1951. 296 p. (In Russ.)

9. Manako V.V., Putilin V.A. Analytical task solution for heating by moving laser beam. *Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2009;1(18):206–213. (In Russ.) DOI: 10.14498/vsgtu664

10. Ashby M.F., Easterling K.E. The Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beams – I. Hypo-Eutectoid Steels. *Acta Metallurgica*. 1984;32(11):1935–1948. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90175-5

11. Babu P.D., Balamurugan K.R., Buvanashekaran G. Laser Surface Hardening: A Review. *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2011;5(2/3):131–151. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2011.041398

12. Sorokin V.G., Gervas'ev M.A. (Eds.). *Stali i splavy. Marochnik: sprav.* [Steels and Alloys. Grade Guide]. Moscow: Intermet Inzhiniring Publ., 2001. 608 p. (In Russ.)

13. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Heat Conduction]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p. (In Russ.)

14. Rosenthal D. The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments. *Transactions of the ASME*. 1946;68:849–866.

15. Naprimerova E., Yachikov I., Latifulina Yu. et al. Mathematical Modeling of Non-Stationary Thermal State of Processed Metal during Its Laser Hardening. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2025;60(1):121–129. DOI: 10.59957/jctm.v60.i1.2025.12

Информация об авторах

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; iachikovim@susu.ru.

Шаталов Егор Андреевич, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; schatalovegor@yandex.ru.

Information about the authors

Igor M. Yachikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; iachikovim@susu.ru.

Egor A. Shatalov, Postgraduate Student of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; schatalovegor@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.09.2025
The article was submitted 21.09.2025

Научная статья
УДК 656.052.1
DOI: 10.14529/ctcr260104

КОНСИСТЕНТНЫЕ ИНВАРИАНТНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНО-ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С БЛОЧНЫМ КОМПЛЕКСИРУЮЩИМ ФИЛЬТРОМ

А.Л. Шестаков, *a.l.shestakov@susu.ru*
Н.И. Циоплиакис, *ntsiopliakis@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0530-0500*
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Математические модели для монокулярных визуально-инерциальных навигационных систем (ВИНС) рассматриваются в контексте известных ограничений рекуррентных алгоритмов фильтрации – проблем консистентности и вычислительной эффективности. **Цель исследования** заключается в разработке консистентных моделей ошибок ВИНС с отслеживанием двух типов визуальных признаков: опорных точек с параметризацией обратной глубины и опорных маркеров типа Aruco, используемых в качестве известных ориентиров. Модели адаптированы для использования в ВИНС на основе быстрого блочного фильтра Калмана (ББФК) – полностью рекуррентного алгоритма, приближающего оценки обобщенного фильтра Калмана (ОФК) при существенно меньших вычислительных затратах. **Материалы и методы.** Математические модели ВИНС линеаризуются относительно право-инвариантных ошибок, анализируется поведение моделей в условиях ненаблюдаемых преобразований параметров ВИНС. Численное тестирование ББФК-ВИНС с разработанными моделями проведено в среде MATLAB с использованием стандартных реализаций KLT-трекера опорных точек и детектора Aruco-маркеров. **Результаты.** Эффективность разработанных моделей для ББФК-ВИНС подтверждена численным моделированием сценария посадки с использованием KLT-трекера и детектора Aruco-маркеров. Показана согласованность расчетных диапазонов 3σ для ошибок оценок комплексирующего фильтра и фактических значений погрешности, отсутствие ложной наблюдаемости, а также ускорение вычислений ББФК по сравнению с обобщенным фильтром Калмана при близости формируемых ими оценок. **Заключение.** Проведенное исследование подтверждает, что при применении в рекуррентных алгоритмах фильтрации разработанные модели позволяют устранить ложную наблюдаемость ошибок оценивания абсолютных позиционных координат и угла рыскания, а также обеспечивают оценивание в условиях большой начальной неопределенности оценок. Перспективы дальнейшей работы связаны с рассмотрением более сложных и продолжительных сценариев движения.

Ключевые слова: рекуррентная фильтрация, ВИНС, маркеры Aruco, параметризация обратной глубины, право-инвариантные ошибки

Для цитирования: Шестаков А.Л., Циоплиакис Н.И. Консистентные инвариантные математические модели для визуально-инерциальной навигационной системы с блочным комплексирующим фильтром // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 43–60. DOI: 10.14529/ctcr260104

© Шестаков А.Л., Циоплиакис Н.И., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260104

CONSISTENT INVARIANT MATHEMATICAL MODELS FOR A VISUAL-INERTIAL NAVIGATION SYSTEM WITH A BLOCK FUSION FILTER

A.L. Shestakov, *a.l.shestakov@susu.ru*
N.I. Tsiopliakis, *ntsiopliakis@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0530-0500*
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Mathematical models for monocular visual-inertial navigation systems (VINS) are considered in the context of well-known limitations of recursive filtering algorithms, namely consistency issues and computational efficiency. **The aim** of the study is to develop consistent VINS error models with tracking of two types of visual features: point landmarks parameterized by inverse depth and ArUco fiducial markers used as known landmarks. The proposed models are adapted for use in a VINS based on a Fast Block Kalman Filter (FBKF), a fully recursive algorithm that approximates the estimates of the Extended Kalman Filter (EKF) at significantly lower computational cost. **Materials and Methods.** The mathematical models of the VINS are linearized with respect to right-invariant errors, and the behavior of the models is analyzed under unobservable transformations of the VINS parameters. Numerical testing of the FBKF-based VINS with the developed models was carried out in the MATLAB environment using standard implementations of a KLT point tracker and an ArUco marker detector. **Results.** The effectiveness of the developed models for the FBKF-based VINS is confirmed by numerical simulation of a landing scenario using a KLT tracker and an ArUco marker detector. Consistency between the predicted 3σ confidence bounds of the fusion filter estimation errors and the actual error values is demonstrated, along with the absence of false observability and an acceleration of FBKF computations compared to the Extended Kalman Filter while maintaining comparable estimation accuracy. **Conclusion.** The conducted study confirms that, when applied in recursive filtering algorithms, the proposed models eliminate false observability of absolute position and yaw estimation errors and enable reliable estimation under conditions of large initial uncertainty. Future work will focus on the analysis of more complex and longer-duration motion scenarios.

Keywords: recursive filtering, VINS, ArUco markers, inverse depth parameterization, right-invariant errors

For citation: Shestakov A.L., Tsiopliakis N.I. Consistent invariant mathematical models for a visual-inertial navigation system with a block fusion filter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):43–60. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260104

Введение

Визуально-инерциальные навигационные системы (ВИНС) оценивают положение и ориентацию подвижного объекта по данным инерциальных датчиков и бортовой видеокамеры. Распространенный вариант ВИНС объединяет бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) с системой технического зрения (СТЗ), отслеживающей неподвижные визуально-контрастные детали окружающей среды, так называемые **визуальные признаки**, на изображениях с видеокамеры. Поскольку перемещение проекций визуальных признаков на плоскость изображения зависит от собственного движения подвижного объекта, данные СТЗ могут служить в качестве источника корректирующей информации для БИНС, дополняя стандартные источники, такие как сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Алгоритмы ВИНС, использующие обобщенный фильтр Калмана (ОФК) [1, 2] для рекуррентного оценивания вектора навигационных параметров подвижного объекта и постоянного вектора параметров положения N визуальных признаков, имеют следующие два основных недостатка: (I) кубическую вычислительную сложность относительно числа визуальных признаков N, ограничивающую число отслеживаемых признаков; (II) неконсистентность линеаризованной математической модели ошибок ВИНС, проявляющуюся в ложной наблюдаемости ошибок оценивания абсолютных позиционных координат и угла рыскания по данным относительного расположения объекта и визуальных признаков [3–6].

В настоящее время в ВИНС широко используются быстрые оконные фильтры типа Multi-State Constraint Kalman Filter (MSCKF) [3, 7–11] с линейной от N вычислительной сложностью, исключающие параметры положения визуальных признаков из уравнений измерения и вектора состояния. Вместо совместного оценивания навигационных параметров и параметров положения признаков в MSCKF-ВИНС формулируется задача оценивания последовательности значений навигационных параметров объекта в пределах скользящего временного окна, что приводит к снижению размерности вектора состояния и вычислительной нагрузки. Оконные фильтры типа MSCKF демонстрируют сниженную погрешность линеаризации по сравнению с полностью рекуррентными ОФК-ВИНС благодаря отложенной линеаризации [7], позволяющей вычислять матрицы Якоби уравнений измерения с использованием более точных оценок положения признаков. С другой стороны, недостатком MSCKF по сравнению с полностью рекуррентным ОФК является ограничение максимальной длительности отслеживания каждого признака шириной временного окна, что не оптимально в условиях, допускающих длительный обзор одних и тех же признаков. В случае использования монокулярной видеокамеры в ВИНС с отслеживанием опорных точек (точечных визуальных признаков), когда в момент первого обнаружения точки известно лишь направление на нее, но не расстояние, снизить погрешность линеаризации и в MSCKF- и в ОФК-ВИНС позволяет параметризация обратной глубины [7, 12–15].

Для борьбы с неконсистентностью в MSCKF- и ОФК-ВИНС применяются такие методы, как вычисление матриц Якоби только по первым оценкам (First Estimation Jacobians, FEJ) [5, 9], внедрение ограничений наблюдаемости (Observability Constrains, OC) [4, 5], параметризация в связанной системе координат подвижного объекта [11, 16], применение инвариантных моделей ошибок [3, 17–20]. По сравнению со стандартной параметризацией в неподвижной опорной системе координат недостатком параметризации в связанной системе координат является избыточный дрейф оценок положения и угла рыскания. FEJ и OC увеличивают погрешность линеаризации, так как предполагают искусственную модификацию точек линеаризации или непосредственно матриц Якоби [4, 5, 9]. При использовании инвариантных моделей ошибок консистентность рекуррентных фильтров ВИНС достигается более естественным образом – за счет учета свойств групп Ли, порожденных преобразованиями ориентации и положения подвижного объекта и признаков [3, 17]. Кроме того, было показано, что рекуррентные ОФК-алгоритмы с инвариантными моделями ошибок достигают примерно той же точности [17], что и алгоритмы инкрементального сглаживания [21, 22].

Право-инвариантная модель ошибок для ВИНС с параметризацией опорных точек декартовыми координатами, анализ ее консистентности и адаптация под архитектуру MSCKF приведены в статье [3], однако в ней не рассмотрены вопросы введения инвариантных ошибок в модель с параметризацией обратной глубины. В статье [20] была рассмотрена право-инвариантная модель ошибок системы визуальной одометрии с отслеживанием 3D-объектов с неизвестным заранее положением.

Целью данной работы является разработка консистентных право-инвариантных моделей для монокулярной ВИНС на основе быстрого блочного фильтра Калмана (ББФК) с отслеживанием опорных точек с параметризацией обратной глубины, а также опорных маркеров типа Aruco [23], используемых в качестве ориентиров с заранее известными оценками положения. Алгоритм ББФК представляет собой реализацию полностью рекуррентного фильтра, позволяющую получать приближенные к оценкам ОФК оценки со сниженной, линейной от числа визуальных признаков N вычислительной сложностью, что достигается за счет экономичной аппроксимации совместной матрицы ковариаций ошибок признаков по методу главных компонент [24].

1. Математические модели ВИНС

1.1. Параметры модели ошибок ББФК-ВИНС

ББФК использует линеаризованную модель ошибок ВИНС [24]. В вектор ошибок $\mathbf{X}=\left[\mathbf{X}_s^T, \mathbf{X}_{1\ldots N}^T\right]^T$ входят: $\mathbf{X}_s$ – вектор ошибок оценивания параметров БИНС; $\mathbf{X}_i$, $i=1\ldots N$ – векторы ошибок оценивания параметров N визуальных признаков. Вектор оценок параметров ВИНС $\hat{\mathbf{x}}=\left[\hat{\mathbf{x}}_s^T, \hat{\mathbf{x}}_{1\ldots N}^T\right]^T$ выражается через вектор их действительных значений $\mathbf{x}=\left[\mathbf{x}_s^T, \mathbf{x}_{1\ldots N}^T\right]^T$ и вектор ошибок $\mathbf{X}$ посредством некоторого оператора ретракции $\oplus$ [25]: $\hat{\mathbf{x}}=\mathbf{x}\oplus\mathbf{X}$.

Линеаризованная модель ошибок измерений, используемая в ББФК, описывает вектор невязок $\mathbf{Y}_i$ как линейную комбинацию шума измерений, ошибок параметров БИНС и ошибок параметров расположения i-го признака:

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{M}_{iv}\boldsymbol{v}_i - \mathbf{H}_{is}\boldsymbol{X}_s - \mathbf{H}_i\boldsymbol{X}_i,\ i = 1...N, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{v}_i \sim \mathcal{N}(0, I)$ – нормированный вектор шума измерений;

$\mathbf{M}_{iv}$, $\mathbf{H}_{is}$, $\mathbf{H}_i$ – матрицы-параметры модели ошибок измерений.

Линеаризованная модель динамики ошибок ВИНС в дискретном времени с шагом Δt, используемая в ББФК на этапе прогноза, определяет изменение ошибок за время Δt:

$$\begin{aligned} &\breve{\mathbf{X}}_s = \mathbf{F}_s\mathbf{X}_s + \mathbf{M}_{ws}\mathbf{w}_s, \\ &\breve{\mathbf{X}}_i = \mathbf{F}_i\mathbf{X}_i + \mathbf{F}_{is}\mathbf{X}_s + \mathbf{M}_{i\,w}\mathbf{w}_i + \mathbf{M}_{i\,ws}\mathbf{w}_s,\ i = 1...N, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\breve{\mathbf{X}}_s$, $\breve{\mathbf{X}}_i$ – ошибки после этапа прогноза $\mathbf{X}_s$ после этапа прогноза (временные индексы упущены для улучшения читаемости);

$\mathbf{w}_s \sim \mathcal{N}(0, I)$, $\mathbf{w}_i \sim \mathcal{N}(0, I)$, $i = 1...N$ – нормированные векторы динамического шума, $\operatorname{cov}(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_s) = 0$, $\operatorname{cov}(\mathbf{w}_i, \mathbf{w}_j) = 0$ при $j \neq i$;

$\mathbf{F}_s, \mathbf{M}_{ws}, \mathbf{F}_i, \mathbf{F}_{is}, \mathbf{M}_{i\,w}, \mathbf{M}_{i\,ws}$ – матрицы-параметры модели динамики ошибок.

1.2. Право-инвариантная ошибка на группе SE(3)

В ВИНС оценивание положения подвижного объекта в опорной системе координат $\boldsymbol{r}_h$ осуществляется с использованием измерений БИНС и СТЗ в связанных с подвижным объектом осях, что приводит к нелинейной зависимости между ошибками положения и ориентации. При линеаризации относительно этих ошибок матрицы Якоби для ошибок ориентации зависят от радиус-вектора положения, который известен с погрешностью; неточность расчетных матриц Якоби приводит к ложной наблюдаемости [3–5].

Решением данной проблемы является линеаризация относительно право-инвариантных ошибок положения ориентации [10, 17].

Рассмотрим группу специальных евклидовых преобразований $SE(3)$, элементы которой описывают ориентацию и положение твердого тела и могут быть представлены в виде блочных матриц перехода 4×4:

$$T_{hb} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{C}_{hb} & \boldsymbol{r}_h \\ 0_{1\times3} & 1 \end{pmatrix},\ T_{hb} \in SE(3),\ \boldsymbol{C}_{hb} \in SO(3),\ \boldsymbol{r}_h \in \mathbb{R}^3, \tag{3}$$

где $\boldsymbol{C}_{hb}$ – матрица перехода из опорной СК в связанную с подвижным объектом СК (ССК).

Право-инвариантная ошибка оценки матрицы перехода $\hat{T}_{hb} \in SE(3)$ определяется следующим образом:

$$\eta^R = \hat{T}_{hb}T_{hb}^{-1} = \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{C}}_{hb}\boldsymbol{C}_{hb}^{\mathrm{T}} & \hat{\boldsymbol{r}}_h - \hat{\boldsymbol{C}}_{hb}\boldsymbol{C}_{hb}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_h \\ 0_{1\times3} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp^{SO(3)}(\delta\boldsymbol{\varphi}_h) & \delta\boldsymbol{r}_h \\ 0_{1\times3} & 1 \end{pmatrix},\ \eta^R \in SE(3), \tag{4}$$

где $\hat{T}_{hb} = \begin{pmatrix} \hat{C}_{hb} & \hat{r}_h \\ 0_{1\times3} & 1 \end{pmatrix}$; $\delta\boldsymbol{r}_h = \hat{\boldsymbol{r}}_h - \delta\boldsymbol{C}_{hb}\boldsymbol{r}_h$, $\delta\boldsymbol{\varphi}_h = \log^{SO(3)}\left(\hat{C}_{hb}C_{hb}^{\mathrm{T}}\right)$.

В вектор ошибок фильтра право-инвариантная ошибка включается посредством 6-мерного векторного представления $\boldsymbol{\xi}$ в касательном пространстве $\mathfrak{se}(3)$. Касательное пространство связано с группой экспоненциальным преобразованием:

$$\boldsymbol{\xi} = \log^{SE(3)}\left(\eta^R\right) = \begin{bmatrix} \delta\boldsymbol{\varphi}_\xi \\ \delta\boldsymbol{r}_\xi \end{bmatrix} = \left[\delta\boldsymbol{\varphi}_h^T, \left(\left[J_l^{SO(3)}(\delta\boldsymbol{\varphi}_h)\right]^{-1}\delta\boldsymbol{r}_h\right)^T\right]^T,\ \boldsymbol{\xi} \in \mathfrak{se}(3), \tag{5}$$

$$\exp^{SE(3)}(\boldsymbol{\xi}) = \begin{pmatrix} \exp^{SO(3)}(\delta\boldsymbol{\varphi}_\xi) & J_l^{SO(3)}(\delta\boldsymbol{\varphi}_\xi)\delta\boldsymbol{r}_\xi \\ 0_{3\times1} & 1 \end{pmatrix} = \eta^R, \tag{6}$$

где $J_l^{SO(3)}(.)$ – левый якобиан $SO(3)$.

Так как $\delta\boldsymbol{\varphi}_{\xi} = \delta\boldsymbol{\varphi}_h$, и $\delta\boldsymbol{r}_{\xi} = \delta\boldsymbol{r}_h + o(\| S(\delta\boldsymbol{\varphi}_h)\delta\boldsymbol{r}_h \|) \approx \delta\boldsymbol{r}_h$, то модели, линеаризованные относительно параметров ξ и η^R ,совпадают.

Линейные модели ошибок с гауссовской аппроксимацией плотности вероятности формулируются именно в $\mathfrak{se}(3)$ – в векторном пространстве, где они корректны с точки зрения геометрии.

Группа $SE(3)$ может быть расширена за счет рассмотрения дополнительных векторов в опорной СК, таких как вектор скорости подвижного объекта, радиус-векторы положения визуальных признаков. На дополнительные векторы распространяются все те же правила преобразования, что и на $\boldsymbol{r}_h$.

1.3. Нелинейные математические модели ВИНС

Введем вектор параметров БИНС со следующим порядком компонентов:

$$\mathbf{x}_{s\,16\times1} = \left[\boldsymbol{q}^T_{hb4\times1} \quad \boldsymbol{r}^T_{h\,3\times1} \quad \boldsymbol{v}^T_{h\,3\times1} \quad \boldsymbol{b}^T_{gyr3\times1} \quad \boldsymbol{b}^T_{acc3\times1}\right]^T, \tag{7}$$

где $\boldsymbol{q}_{hb}$ – кватернион перехода из опорной СК в ССК;

$\boldsymbol{r}_h$, $\boldsymbol{v}_h$ – векторы положения и скорости подвижного объекта в опорной СК;

$\boldsymbol{b}_{gyr}$, $\boldsymbol{b}_{acc}$ – смещения нуля ДУС и акселерометра соответственно.

Здесь и далее принято, что ось OZ_h опорной СК направлена по местной вертикали в точке расположения ее центра; с поворотом вокруг оси OZ_h свяжем угол рыскания.

Модели измерений трехосевых ДУС $\boldsymbol{\omega}_{gyr}$ и акселерометра $\boldsymbol{n}_{acc}$ учитывают смещения нуля и белый шум измерений:

$$\boldsymbol{\omega}_{gyr\,3\times1} = \boldsymbol{C}^T_{hb}\boldsymbol{\omega}_h - \boldsymbol{b}_{gyr} + \boldsymbol{v}_{\omega},\ \boldsymbol{n}_{acc\,3\times1} = \boldsymbol{C}^T_{hb}\left(\boldsymbol{a}_h - \boldsymbol{g}_h\right) - \boldsymbol{b}_{acc} + \boldsymbol{v}_n, \tag{8}$$

где $\boldsymbol{C}_{hb} = C(\boldsymbol{q}_{hb})$ – матрица перехода из опорной СК в ССК;

$\boldsymbol{\omega}_h$, $\boldsymbol{a}_h$, $\boldsymbol{g}_h$ – векторы угловой скорости, линейного ускорения и гравитационного ускорения в опорной СК соответственно;

$\boldsymbol{v}_{\omega}$, $\boldsymbol{v}_n$ – белые гауссовы шумы измерений.

Инерциальные оценки рассчитываются путем интегрирования уравнений БИНС:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{q}}}_{hb} = 1/2\,\hat{\boldsymbol{q}}_{hb} \circ \left(\boldsymbol{\omega}_{gyr} + \hat{\boldsymbol{b}}_{gyr}\right),\ \dot{\hat{\boldsymbol{v}}}_h = \hat{\boldsymbol{C}}_{hb}\left(\boldsymbol{n}_{acc} + \hat{\boldsymbol{b}}_{acc}\right) + \boldsymbol{g}_h,\ \dot{\hat{\boldsymbol{r}}}_h = \hat{\boldsymbol{v}}_h, \tag{9}$$

где $\boldsymbol{r}_h$, $\boldsymbol{v}_h$ – векторы положения и скорости подвижного объекта в опорной СК.

Измерения СТЗ представляют собой однородные координаты $\boldsymbol{q}^{CV}_i$ проекции i-й опорной точки на плоскость изображения видеокамеры, чему соответствует следующая нелинейная модель измерений:

$$\boldsymbol{q}^{CV}_{i\,2\times1} = h(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_i, \mathbf{v}^{CV}_i) := \pi_c\left(\boldsymbol{C}^T_{hb}\left(\boldsymbol{r}^i_h - \boldsymbol{r}_h,\right) - \boldsymbol{d}^c_b\right) + \mathbf{v}^{CV}_i,\ \pi_c(.) = \pi\left(\boldsymbol{C}^T_{bc}(.)\right), \tag{10}$$

где $\mathbf{v}^{CV}_i$ – дискретный белый шум измерений;

$\boldsymbol{C}_{bc}$ – матрица перехода из ССК в СК камеры;

$\boldsymbol{d}^c_b$ – вектор положения центра СК камеры в ССК;

$\pi(\boldsymbol{l}_c) = \left[\boldsymbol{l}_{c\,1}, \boldsymbol{l}_{c\,2}\right]^T \Big/ \boldsymbol{l}_{c\,3}$ – функция проецирования на плоскость $z_c = 1$.

Модель измерений по опорным точкам с параметризацией обратной глубины. При параметризации обратной глубины [12] радиус-вектор положения i-й опорной точки в опорной СК выражается как:

$$\boldsymbol{r}^i_h = \boldsymbol{r}^{c\,i}_h + \frac{1}{\rho^i}\boldsymbol{m}^i_h,\quad \mathbf{x}^{(\mathrm{idp})}_{i\ 7\times1} = \left[\boldsymbol{r}^{c\,i\,T}_{h\ 3\times1}, \boldsymbol{m}^{i\,T}_{h\ 3\times1}, \rho^i_{\ 1\times1}\right]^T,\ i = 1 \ldots N^{(\mathrm{idp})}, \tag{11}$$

где $\boldsymbol{r}^{c\,i}_h$ – радиус-вектор центра СК камеры в момент первого наблюдения i-й опорной точки;

$\boldsymbol{m}^i_h$ – вектор направления на i-ю опорную точку в момент ее первого наблюдения;

ρ^i – обратная глубина положения i-й опорной точки вдоль луча, исходящего из точки $\boldsymbol{r}_h^{c\,i}$ вдоль $\boldsymbol{m}_h^i$;

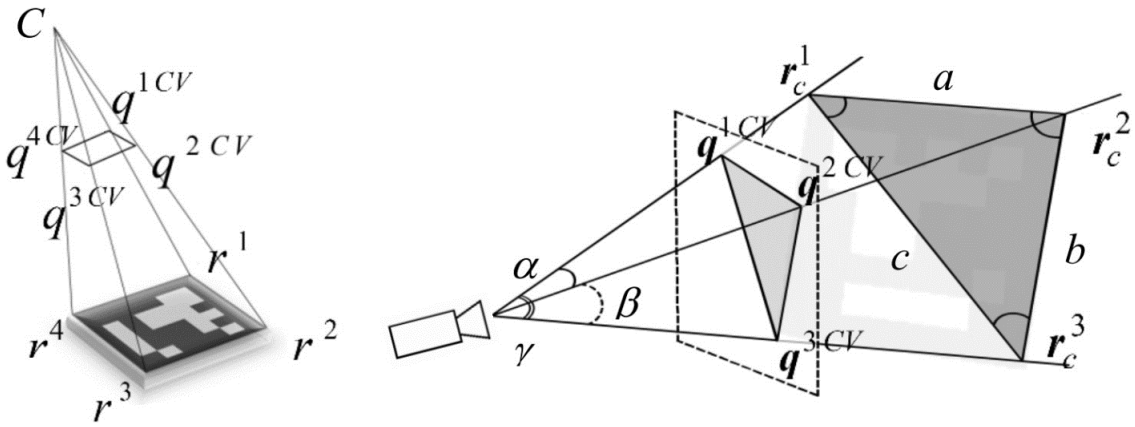
$\mathbf{x}_i^{(\mathrm{idp})}$ – вектор параметров обратной глубины.

Запишем на основе (10) и (11) выражение для измеренных СТЗ однородных координат точки с параметризацией обратной глубины:

$$\boldsymbol{q}_i = \pi_c\left(\rho^i\left[\boldsymbol{C}_{hb}^T\left(\boldsymbol{r}_h^{c\,i} - \boldsymbol{r}_h,\right) - \boldsymbol{d}_b^c\right] + \boldsymbol{C}_{hb}^T\boldsymbol{m}_h^i\right) + \mathbf{v}_i^{CV}. \tag{10a}$$

Аргумент функции проецирования $\pi_c(.)$ в (10a) был домножен на скаляр ρ^i, что не меняет ее значения, но позволяет повысить устойчивость при $\rho^i \to 0$ [12].

Модель измерений по опорным маркерам. СТЗ производит распознавание квадратного опорного маркера, идентифицирует его ID и определяет однородные координаты $q^{i\,CV}$, i = 1…4, проекций его 4 угловых точек на плоскость изображения (рис. 1a).



a) b)

Рис. 1. Измерения СТЗ по опорным маркерам:
a – однородные координаты углов маркера; b – использование в P3P
Fig. 1. CV measurements using fiducial markers:
a – homogeneous coordinates of the marker corners; b – use in the P3P

Поскольку длина стороны маркера заранее известна, положение и ориентация маркера относительно монокулярной видеокамеры могут быть оценены по единственному изображению при помощи алгоритма perspective-3-point (P3P) [26]. P3P-оценка матрицы перехода $\hat{T}_{cm}^{P3P} \in SE(3)$, описывающей положение и ориентацию маркера относительно камеры, находится из условия совпадения расчетных и измеренных проекций его трех угловых точек $\boldsymbol{r}_c^1$, $\boldsymbol{r}_c^2$, $\boldsymbol{r}_c^3$ (рис. 1b):

$$\boldsymbol{q}^{i\;\;CV} = \pi\left(\hat{T}_{cm\,[1:3,\,1:4]}^{P3P} \cdot \left[\boldsymbol{r}_m^{i\;T}, 1\right]^T\right),\; i = 1...3, \tag{12}$$

где $\boldsymbol{r}_m^i$ – координаты угловых точек маркера в СК маркера.

Задача P3P может иметь до четырех различных решений; выделение одного решения производится по критерию минимальности ошибки перепроектирования неиспользованной точки $\boldsymbol{r}_c^4$.

Зная $\hat{T}_{cm}^{P3P}$, а также положение и ориентацию маркера в опорной СК, можно оценить положение подвижного объекта в опорной СК. Введем векторы параметров маркеров:

$$\mathbf{x}_m^{(\mathrm{mrk})}{}_{7\times1} = \left[\boldsymbol{q}_{hm\;4\times1}^T\;\boldsymbol{r}_{h\;3\times1}^{m\;T}\right]^T,\; m = 1...N^{(\mathrm{mrk})}, \tag{13}$$

где $\boldsymbol{q}_{hb}$ – кватернион перехода из опорной СК в СК m-го маркера;

$\boldsymbol{r}_h^m$ – вектор положения m-го маркера в опорной СК.

1.4. Выбор параметризации моделей ошибок

Введем вектор ошибок БИНС $\mathbf{X}_s$, включающий право-инвариантные ошибки (5):

$$\mathbf{X}_{s\,15\times1} = \left[\delta\boldsymbol{\varphi}^T_{\xi\,3\times1} \quad \delta\boldsymbol{r}^T_{\xi\,3\times1} \quad \delta\boldsymbol{v}^T_{\xi\,3\times1} \quad \delta\boldsymbol{b}^T_{gyr\,3\times1} \quad \delta\boldsymbol{b}^T_{acc\,3\times1}\right]^T. \tag{14}$$

Будем рассматривать вектор ошибок i-й опорной точки с параметризацией обратной глубины следующего вида:

$$\mathbf{X}^{(\mathrm{idp})}_{i\,7\times1} = \left[\delta\boldsymbol{r}^{c\,i\,T}_{\xi\;3\times1}, \delta\boldsymbol{m}^{i\,T}_{\xi\;3\times1}, \delta\rho^{i}_{\;1\times1}\right]^T, \tag{15}$$

где $\delta\boldsymbol{r}^{c\,i}_{\xi} = J^{-1}_{l\,(\delta\boldsymbol{\varphi}_h)}\delta\boldsymbol{r}^{c\,i}_{h}$;

$\delta\boldsymbol{m}^{c\,i}_{\xi} = J^{-1}_{l\,(\delta\boldsymbol{\varphi}_h)}\delta\boldsymbol{m}^{c\,i}_{h}$;

$\delta\boldsymbol{r}^{c\,i}_{h} = \hat{\boldsymbol{r}}^{c\,i}_{h} - \delta\boldsymbol{C}_{hb}\boldsymbol{r}^{c\,i}_{h}$ – право-инвариантная ошибка оценки $\boldsymbol{r}^{c\,i}_{h}$;

$\delta\boldsymbol{m}^{c\,i}_{h} = \hat{\boldsymbol{m}}^{c\,i}_{h} - \delta\boldsymbol{C}_{hb}\boldsymbol{m}^{c\,i}_{h}$ – право-инвариантная ошибка оценки $\boldsymbol{m}^{c\,i}_{h}$;

$\delta\rho^{i}$ – ошибка оценки обратной глубины ρ^{i}.

Выбранный вектор ошибок имеет размерность 7, что превышает стандартную для точек с параметризацией обратной глубины размерность (6 компонент) [12], зато, как будет показано ниже, данный выбор обеспечивает консистентность. Кроме того, при применении в ББФК увеличение размерности вектора состояния не так критично, как в стандартной реализации ОФК, в связи с линейной вычислительной сложностью ББФК. Также после уменьшения начальной неопределенности оценки параметров обратной глубины могут быть сконвертированы в оценку радиус-вектора положения, имеющую 3-мерный вектор ошибок:

$$\mathbf{X}^{(\mathrm{dec})}_{i\,3\times1} = \delta\boldsymbol{r}^{i}_{\xi} = J^{-1}_{l\,(\delta\boldsymbol{\varphi}_h)}\delta\boldsymbol{r}^{i}_{h}, \tag{16}$$

где $\delta\boldsymbol{r}^{i}_{h} = \hat{\boldsymbol{r}}^{i}_{h} - \delta\boldsymbol{C}_{hb}\boldsymbol{r}^{i}_{h}$ – право-инвариантная ошибка оценки положения i-й опорной точки в опорной системе координат.

Выберем параметризацию ошибок положения и ориентации опорного маркера. Параметризация, рассмотренная в статье [20], использует представление для право-инвариантной ошибки положения, аналогичное (16), что обеспечивает консистентность при инициализации положения маркера по относительными измерениями в ССК подвижного объекта. В нашем случае маркеры служат ориентирами с заранее заданными оценками положения в опорной системе координат, независимыми от оценок положения подвижного объекта. Поэтому удобнее использовать другую параметризацию, в которой право-инвариантная ошибка определена независимо от ориентации подвижного объекта:

$$\mathbf{X}_{m\,6\times1} = \xi^m = \left[\delta\boldsymbol{\varphi}^{m\,T}_{\xi^m\;3\times1}, \delta\boldsymbol{r}^{m\,T}_{\xi^m\;3\times1}\right]^T, \tag{17}$$

где $\xi^m = \log^{SE(3)}\left(\hat{T}_{hm}T^{-1}_{hm}\right)$, $\hat{T}_{hm}, T_{hm} \in SE(3)$ – оценочное и действительное значение матрицы перехода, описывающей положение и ориентацию маркера в опорной СК.

Оператор ретракции. Для улучшения читаемости рассмотрим ВИНС с одним визуальным признаком каждого типа:

$$\mathbf{x} = \left[\mathbf{x}^T_s, \mathbf{x}^{(\mathrm{dec})\,T}_1, \mathbf{x}^{(\mathrm{idp})\,T}_2, \mathbf{x}^{(\mathrm{mrk})\,T}_3\right]. \tag{18}$$

Приведем выражения для оператора ретракции, в соответствии с которым вектор ошибок ВИНС $\mathbf{X}$ вводится в вектор оценок параметров ВИНС $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} \oplus \mathbf{X}$:

$$\hat{\mathbf{x}}_s = \Big[\left(\delta \boldsymbol{q}(\delta\varphi_\xi) \circ \boldsymbol{q}_{hb}\right)^T, \left(\delta C(\delta\varphi_\xi)\cdot \boldsymbol{r}_h + J_l(\delta\varphi)\cdot \delta \boldsymbol{r}_\xi\right)^T, \left(\delta C(\delta\varphi_\xi)\cdot \boldsymbol{v}_h + J_l(\delta\varphi_\xi)\cdot \delta \boldsymbol{v}_\xi\right)^T,$$
$$\left(\boldsymbol{b}_{gyr} + \delta \boldsymbol{b}_{gyr}\right)^T, \left(\boldsymbol{b}_{acc} + \delta \boldsymbol{b}_{acc}\right)^T \Big]^T,$$
$$\hat{\mathbf{x}}_1^{(\mathrm{dec})} = \delta C(\delta\varphi_\xi)\cdot \boldsymbol{r}_h^1 + J_l(\delta\varphi_\xi)\cdot \delta \boldsymbol{r}_\xi^1, \tag{19}$$
$$\hat{\mathbf{x}}_2^{(\mathrm{idp})} = \Big[\left(\delta C(\delta\varphi_\xi)\cdot \boldsymbol{r}_h^{c\,2} + J_l(\delta\varphi_\xi)\cdot \delta \boldsymbol{r}_\xi^{c\,2}\right)^T, \left(\delta C(\delta\varphi_\xi)\cdot \boldsymbol{m}_h^{c\,2} + J_l(\delta\varphi_\xi)\cdot \delta \boldsymbol{m}_\xi^{c\,2}\right)^T, \rho^2 + \delta\rho^2 \Big]^T,$$
$$\hat{\mathbf{x}}_3^{(\mathrm{mrk})} = \Big[\left(\delta \boldsymbol{q}(\delta\varphi_\xi^3) \circ \boldsymbol{q}_{hb}\right)^T, \left(\delta C(\delta\varphi_\xi^3)\cdot \boldsymbol{r}_h^3 + J_l(\delta\varphi_\xi^3)\cdot \delta \boldsymbol{r}_\xi^3\right)^T \Big]^T,$$

где $\delta \boldsymbol{q}(\delta\varphi) = \left[\cos(\|\delta\boldsymbol{\varphi}\|/2), \sin(\|\delta\boldsymbol{\varphi}\|/2)/\|\delta\boldsymbol{\varphi}\|\,\delta\boldsymbol{\varphi}^T\right]^T$;

$\delta C(\delta\varphi) = \exp^{SO(3)}(\delta\varphi)$.

Выражения (19) используются при вводе поправок, вычисленных фильтром на этапе коррекции: $\hat{\mathbf{x}} \leftarrow \hat{\mathbf{x}} \oplus \mathbf{KY}$.

1.5. Линеаризованные математические модели ВИНС

Модель ошибок измерений по опорным точкам с параметризацией обратной глубины. Получим по (10а) линеаризованное выражение для невязки между измерением и прогнозом $\mathbf{Y}_i = \boldsymbol{q}_i - \hat{\boldsymbol{q}}_i$:

$$\mathbf{Y}_i \approx \mathbf{v}_i^{CV} - \partial\pi_c \hat{\boldsymbol{C}}_{hb}^T \left[\hat{\rho}^i \left(\delta \hat{\boldsymbol{r}}_\xi^{c\,i} - \delta \boldsymbol{r}_\xi\right) + \delta \boldsymbol{m}_\xi^i\right] - \partial\pi_c \hat{\boldsymbol{l}}_\rho \delta\rho^i, \tag{20}$$

где $\partial\pi_c = \partial\pi \cdot \boldsymbol{C}_{bc}^T$, $\partial\pi = \left(\dfrac{\partial\pi}{\partial \boldsymbol{l}_c}\Big|_{\hat{\boldsymbol{l}}_c}\right) = \begin{bmatrix} 1/\hat{\boldsymbol{l}}_{c\,3} & 0 & -\hat{\boldsymbol{l}}_{c\,1}/\hat{\boldsymbol{l}}_{c\,3}^2 \\ 0 & 1/\hat{\boldsymbol{l}}_{c\,3} & -\hat{\boldsymbol{l}}_{c\,2}/\hat{\boldsymbol{l}}_{c\,3}^2 \end{bmatrix}$;

$$\hat{\boldsymbol{l}}_c = \boldsymbol{C}_{bc}^T \left(\hat{\rho}^i \left[\hat{\boldsymbol{C}}_{hb}^T \left(\hat{\boldsymbol{r}}_h^{c\,i} - \hat{\boldsymbol{r}}_h,\right) - \boldsymbol{d}_b^c\right] + \hat{\boldsymbol{C}}_{hb}^T \hat{\boldsymbol{m}}_h^i\right);\ \hat{\boldsymbol{l}}_\rho = \left[\hat{\boldsymbol{C}}_{hb}^T \left(\hat{\boldsymbol{r}}_h^{c\,i} - \hat{\boldsymbol{r}}_h\right) - \boldsymbol{d}_b^c\right].$$

Запишем матрицы-параметры модели измерений ББФК (1):

$$\mathbf{M}_{iv} = \sigma_{CV} \cdot \boldsymbol{I}_{2\times 2},\ \mathbf{H}_{is} = \left[0_{2\times 3}, -\hat{\rho}^i \mathbf{H}_{im}, 0_{2\times 9}\right],\ \mathbf{H}_i = \left[\hat{\rho}^i \mathbf{H}_{im}, \mathbf{H}_{im}, \partial\pi_c \hat{\boldsymbol{l}}_\rho\right], \tag{21}$$

где $\mathbf{H}_{im} = \partial\pi_c \hat{\boldsymbol{C}}_{hb}^T$.

Свойство консистентности для модели ошибок измерений можно формализовать как нечувствительность матрицы ковариации невязок измерений $\mathbf{Y}_i$ к ненаблюдаемому единичному стохастическому преобразованию параметров ВИНС [3], т. е. (I) к равному случайному смещению $\boldsymbol{s}_u \sim \mathcal{N}\left(0, \mathbf{P}_{\boldsymbol{s}_u}\right)$ всех радиус-векторов положения признаков; (II) к равному повороту всех векторов в опорной СК на случайный угол $\psi_u \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_{\psi_u}^2\right)$ вокруг вектора гравитационного ускорения $\boldsymbol{g}$ (т. е. повороту по углу рыскания).

Для предложенной модели нечувствительность к $\boldsymbol{s}_u$ выполняется в связи с тем, что в (20) входит только разность радиус-векторов; нечувствительность к ψ_u выполняется в связи с нечувствительностью матриц ковариаций право-инвариантных ошибок векторов к ошибке поворота:

$$\delta \boldsymbol{l}_h = \hat{\boldsymbol{l}}_h\left(\psi_u\right) - \delta \boldsymbol{C}_{hb}\left(\psi_u\right)\boldsymbol{l}_h = \left[\boldsymbol{l}_h + S\left(\psi_u \boldsymbol{k}\right)\boldsymbol{l}_h\right] - \left[\boldsymbol{l}_h + S\left(\psi_u \boldsymbol{k}\right)\boldsymbol{l}_h\right] + o(\|\psi_u\|) \approx 0,$$
$$\Rightarrow \boldsymbol{P}_{\delta \boldsymbol{l}_h} = 0_{3\times 3}, \tag{22}$$

где $\boldsymbol{l}_h, \delta \boldsymbol{l}_h$ – вектор в опорной СК и его право-инвариантная ошибка;

$\boldsymbol{k}$ – орт оси OZ_h;

$S(.)$ – кососимметрическая матрица векторного умножения.

Дополнительно следует отметить, что матрицы Якоби модели (20) нечувствительны к детерминированным ненаблюдаемым преобразованиям сдвига и поворота.

Модель ошибок измерений по опорному маркеру. Введем право-инвариантную ошибку P3P-оценок:

$$\xi^{P3P} = \log^{SE(3)}\left(\hat{T}_{cm}^{P3P}\left[T_{cm}\right]^{-1}\right) = \left[\delta\boldsymbol{\varphi}_{\xi CV}^{T},\ \delta\boldsymbol{r}_{\xi CV}^{T}\right]^{T}. \tag{23}$$

Линеаризовав (12) относительно ξ^{P3P} и шума измерений СТЗ $\boldsymbol{v}^{CV}$ в предположении малости этих величин, получим следующее выражение:

$$\boldsymbol{v}^{CV} = \mathbf{A}\cdot\xi^{P3P},\ \mathbf{A} = \left[\mathbf{A}_1^T, \mathbf{A}_2^T, \mathbf{A}_3^T\right]^T,\quad \boldsymbol{v}^{CV} = \left[\boldsymbol{v}^{1\,CV\,T}, \boldsymbol{v}^{2\,CV\,T}, \boldsymbol{v}^{3\,CV\,T}\right]^T, \tag{24}$$

где $\mathbf{A}_i = \partial\pi^i\left[-S\left(\hat{\boldsymbol{r}}_c^i\right), \boldsymbol{I}_3\right]$; $\boldsymbol{v}^{CV} \sim \mathcal{N}\left(0, \boldsymbol{I}_6\sigma^{CV}\right)$.

Сформируем вектор невязок таким образом, чтобы обеспечить для модели ошибок измерений по опорному маркеру линейность по право-инвариантной ошибке ξ подвижного объекта. Это требуется, так как в рамках рассматриваемого сценария применения ВИНС ошибка ξ может быть велика. Ошибки оценок расположения маркера ξ^m и P3P-оценок ξ^{P3P} можно считать малыми.

Рассмотрим групповую невязку $\chi \in SE(3)$ между P3P-оценками и оценками расположения подвижного объекта и маркера:

$$\chi = \hat{T}_{hc}T_{cm}^{P3P}\hat{T}_{hm}^{-1} = \exp^{SE(3)}\left(\left[J_r^{SE(3)}(-\xi)\right]^{-1}\mathrm{Ad}_{\hat{T}_{hc}}\cdot\xi^{P3P} + \right.$$
$$\left. + \xi - \left[J_r^{SE(3)}(\xi)\right]^{-1}\xi^m\right) + o\left(\left\|\xi^{P3P}\right\| + \left\|\xi^m\right\|\right), \tag{25}$$

где $\mathrm{Ad}_{\hat{T}_{hc}} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{C}}_{hc} & 0_{3\times3} \\ S\left(\hat{\boldsymbol{r}}_h^c\right)\hat{\boldsymbol{C}} & \hat{\boldsymbol{C}}_{hc}\end{bmatrix}$; $J_r^{SE(3)}(\xi) = \begin{pmatrix} J_r^{SO(3)}\left(\delta\boldsymbol{\varphi}_\xi\right) & 0_{3\times3} \\ Q(\xi) & J_r^{SO(3)}\left(\delta\boldsymbol{\varphi}_\xi\right)\end{pmatrix}$ – правый якобиан $SE(3)$, $J_r^{SE(3)}(\xi) = \boldsymbol{I}_6 + o(\|\xi\|)$.

В качестве вектора невязок $\mathbf{Y}_m$ будем использовать вектор $\boldsymbol{y} = \log^{SE(3)}(\chi)$, домноженный на матрицу, обеспечивающую декорреляцию ошибок P3P-оценок в соответствии с моделью (24):

$$\mathbf{Y}_m = \left[\mathbf{A}\,\mathrm{Ad}_{\hat{T}_{hc}^{-1}}\tilde{\boldsymbol{J}}_l\right]\cdot\boldsymbol{y} \approx \boldsymbol{v}^{CV} - \mathbf{A}\,\mathrm{Ad}_{\hat{T}_{hc}^{-1}}\tilde{\boldsymbol{J}}_l\cdot(\xi_m - \xi). \tag{26}$$

где $\tilde{\boldsymbol{J}}_l = J_r^{SE(3)}\left(-\tilde{\xi}\right)$, $\tilde{\xi} = \left[0, 0, \boldsymbol{y}_3, ..., \boldsymbol{y}_6\right]^T$ – при первой коррекции по маркеру; $\tilde{\boldsymbol{J}}_l = \boldsymbol{I}_6$ – при последующих коррекциях по маркеру.

Такая декорреляция позволяет избежать необходимости обращения матрицы **A**, которая может вырождаться при некоторых положениях маркера относительно камеры. Учет $\tilde{\boldsymbol{J}}_l$ позволяет, не прибегая к итеративному оцениванию [27], повысить точность линеаризованной модели вектора невязок в условиях значительных ошибок оценок угла рыскания и координат в опорной СК подвижного объекта при первом наблюдении маркера.

Отметим, что при стремлении ξ^m, ξ^{P3P} к нулю $\boldsymbol{y}$ стремится к ξ, обеспечена линейность по ξ.

Запишем матрицы-параметры модели измерений ББФК (1):

$$\mathbf{M}_{iv} = \sigma_{CV}\cdot\boldsymbol{I}_6,\ \mathbf{H}_{is} = \left[-\mathbf{H}_i, 0_{6\times9}\right],\ \mathbf{H}_i = \mathbf{A}\,\mathrm{Ad}_{\hat{T}_{hc}^{-1}}\tilde{\boldsymbol{J}}_l. \tag{27}$$

Консистентность модели (26), эквивалентная нечувствительности к равному стохастическому преобразованию $\xi_u = \left[\psi_u\boldsymbol{k}^T, J_l^{-1}\left(\psi_u\boldsymbol{k}\right)\boldsymbol{s}^T\right]^T$ положения и ориентации подвижного объекта и маркера, обеспечивается тем, что в модель входит только разность $\xi_m - \xi$. Отметим, что матрицы Якоби модели (26) нечувствительны к детерминированному ненаблюдаемому преобразованию в линейном приближении.

Модель динамики для право-инвариантных ошибок ВИНС. Использование дополнительных типов визуальных признаков – опорных точек с параметризацией обратной глубины и опорных маркеров – потребовало расширения модели динамики ВИНС с право-инвариантной ошибкой, рассмотренной в [15]. Сформированная модель описывает динамику ошибок параметров БИНС и ошибок параметров положения для используемых типов признаков. Приведем матрицы динамики ошибок БИНС в обозначениях ББФК (2):

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & \boldsymbol{C}_{hb} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & \mathbf{I}_{3\times3} & S(\boldsymbol{r}_h)\boldsymbol{C}_{hb} & 0_{3\times3} \\ S(\boldsymbol{g}_h) & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & S(\boldsymbol{v}_h)\boldsymbol{C}_{hb} & \boldsymbol{C}_{hb} \\ 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & -\mathbf{I}_{3\times3}/T_{m\ gyr} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & -\mathbf{I}_{3\times3}/T_{m\ acc} \end{bmatrix}, \ \mathbf{F}_s = \mathbf{I}_{15} + \Delta t \cdot \mathbf{A}_s, \tag{28}$$

$$\mathbf{M}_{ws} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{hb\ ARW}\sqrt{\Delta t} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ S(\boldsymbol{r}_h)\boldsymbol{C}_{hb\ ARW}\sqrt{\Delta t} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ S(\boldsymbol{v}_h)\boldsymbol{C}_{hb\ ARW}\sqrt{\Delta t} & \boldsymbol{C}_{hb\ VRW}\sqrt{\Delta t} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & \sigma_{b\ acc} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & \sigma_{b\ gyr} \end{bmatrix}, \tag{29}$$

где Δt – шаг по времени; $\boldsymbol{\omega}_h$, $\boldsymbol{g}_h$ – векторы угловой скорости и ускорения свободного падения в опорной СК; $T_{m\,gyr}$, $T_{m\,acc}$ – значения времени корреляции для смещений нуля ДУС, акселерометра, а также для ошибки синхронизации БИНС и СТЗ; $\sigma_{b\ gyr}, \sigma_{b\ acc}$ – СКО входного шума формирующих фильтров для смещений нуля ДУС, акселерометра.

Формирующие фильтры для смещений нуля инерциальных датчиков настроены на экспоненциально-коррелированный процесс:

$$\sigma_b = \sigma_m \sqrt{\left(2 - \frac{\Delta t}{T_m}\right)\frac{\Delta t}{T_m}}, \tag{30}$$

где σ_m – СКО экспоненциально-коррелированного процесса.

Приведем матрицы динамики признаков в обозначениях (2).

1. Для опорных точек с параметризацией декартовыми координатами:

$$\begin{gathered} \mathbf{F}_{is} = \left[0_{3\times9},\ S\left(\boldsymbol{r}_h^i\right)\boldsymbol{C}_{hb}\,\Delta t,\ 0_{3\times3}\right],\ \mathbf{M}_{i\,ws} = \left[S\left(\boldsymbol{r}_h^i\right)\boldsymbol{C}_{hb\ ARW}\sqrt{\Delta t},\ 0_{3\times9}\right], \\ \mathbf{F}_i = \mathbf{I}_3,\ \mathbf{M}_{i\,w} = 0_{3\times1},\ i = 1...N^{(\mathrm{dec})}. \end{gathered} \tag{31}$$

2. Для опорных точек с параметризацией обратной глубины:

$$\begin{gathered} \mathbf{F}_{is} = \begin{bmatrix} 0_{3\times9} & S\left(\boldsymbol{r}_h^{c\,i}\right)\boldsymbol{C}_{hb}\,\Delta t, & 0_{4\times9} \\ 0_{3\times9} & S\left(\boldsymbol{m}_h^i\right)\boldsymbol{C}_{hb}\,\Delta t, & 0_{4\times9} \\ & 0_{1\times15} & \end{bmatrix},\ \mathbf{M}_{i\,ws} = \begin{bmatrix} S\left(\boldsymbol{r}_h^{c\,i}\right)\boldsymbol{C}_{hb\ ARW}\sqrt{\Delta t}, & 0_{3\times9} \\ S\left(\boldsymbol{m}_h^i\right)\boldsymbol{C}_{hb\ ARW}\sqrt{\Delta t}, & 0_{3\times9} \\ 0_{1\times12} & \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}_i = \mathbf{I}_7,\ \mathbf{M}_{i\,w} = 0_{7\times1},\ i = 1...N^{(\mathrm{idp})}. \end{gathered} \tag{32}$$

3. Для опорных маркеров:

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{I}_6,\ \mathbf{F}_{ms} = 0_{6\times15},\ \mathbf{M}_{m\,ws} = 0_{6\times12},\ \mathbf{M}_{m\,w} = 0_{6\times1},\ m = 1...N^{(\mathrm{mrk})}. \tag{33}$$

Свойство консистентности для моделей динамики эквивалентно отсутствию динамики для ненаблюдаемого стохастического преобразования параметров ВИНС. Для этого должно обеспечиваться $\mathbf{A}_s\left[\xi_u^T, 0_{1\times9}\right]^T = 0_{15\times1}$, что выполнено, так как $S(\boldsymbol{g}_h)\cdot\psi_u\boldsymbol{k} = g\psi_u\boldsymbol{k}\times\boldsymbol{k} = 0$.

2. Тестирование ББФК-ВИНС с разработанными моделями

2.1. Условия моделирования

Моделирование производится в среде MATLAB, отслеживание опорных точек на виртуальной текстурированной сцене реализовано на основе KLT-трекера. Рассмотрим параметры моделирования. **Инерциальные датчики**. Случайное блуждание угла ДУС $ARW = 0{,}015\,°/\sqrt{\text{с}}$, экспоненциально-коррелированный шум ДУС с параметрами $\sigma_{m\,gyr} = 0{,}05\ °/\text{с}$, $T_{m\,gyr} = 20\ \text{с}$. Случайное блуждание скорости акселерометра $VRW = 0{,}03\ \text{м}/\text{с}\sqrt{\text{с}}$, экспоненциально-коррелированный шум акселерометра с параметрами $\sigma_{m\,acc} = 0{,}00015\ \text{м}/\text{с}^2$, $T_{m\,acc} = 20\ \text{с}$. **Техническое зрение**. СКО шума однородных координат проекции опорной точки на плоскость кадра $CV_{\text{noise}} = 0{,}003$. Разрешение кадров: 1920×1080. Дисторсия кадров не моделируется. Максимальное число отслеживаемых точек $N_{\max} = 300$. **Частота работы**. БИНС – 400 Гц, СТЗ – 20 Гц. **Параметры траектории и движения**. Спуск с высоты $H_0 = 20$ м до высоты $H_1 = 2$ м с максимальной скоростью 2 м/с при воздействии случайных динамических возмущений. В верхнем и нижнем положениях – зависание над сценой. Движение продолжается 15 с. **Начальные ошибки навигационных параметров**. Ошибка по углу тангажа $\Delta\theta_0 = -0{,}1°$, ошибка по углу крена $\Delta\gamma_0 = 0{,}1°$. Ошибки остальных параметров нулевые.

2.2. Тестирование ББФК-ВИНС с отслеживанием опорных точек

Произведем численное моделирование работы ББФК-ВИНС при использовании параметризации обратной глубины и разработанных моделей динамики и измерений, сформулированных относительно право-инвариантных ошибок ВИНС. Чтобы подчеркнуть устойчивость параметризации обратной глубины к параметрической неопределённости, для всех точек будем использовать одни и те же начальные значения обратной глубины и ее СКО: $\rho_0 = 0{,}5$, $\sigma_{\rho 0} = 1$.

Результаты численного моделирования позволят проверить как корректность реализации разработанных моделей ошибок, так и работу ББФК при их использовании. Будем варьировать число главных компонент n_e, используемых в ББФК при аппроксимации корреляционной матрицы ошибок оценок.

Для оценок координат (pos), скорости (vel), ориентации (att) построим графики среднеквадратических ошибок при заданных n_e, нормированные на ошибку ОФК (рис. 2a), а также графики нормированного среднеквадратического расхождения между оценками при заданных n_e и оценками стандартного ОФК (рис. 2b).

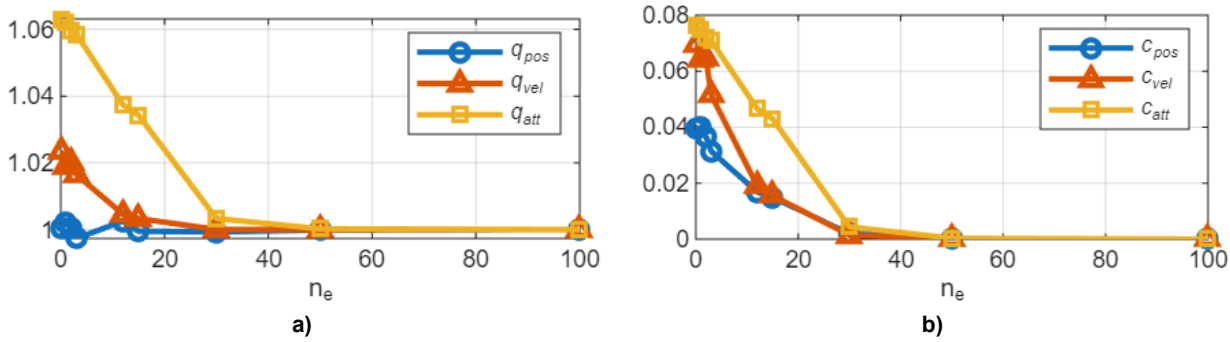


Рис. 2. Зависимость от n_e значений нормированных: a – среднеквадратических ошибок; b – среднеквадратических расхождений относительно оценок ОФК

Fig. 2. Dependence on n_e of the normalized values of: a – RMS errors; b – RMS deviations relative to the EKF estimates

Как видно из графиков на рис. 2a, b, наблюдается сходимость оценок ББФК к оценкам ОФК с ростом n_e. При $n_e > 30$ расхождение менее 0,5 %, при $n_e > 50$ расхождение менее 0,05 %. Сред-

нее время вычислений одной итерации ББФК (шаг прогноза + шаг коррекции) составило 43 мс (при n_e = 100 и N = 300), что примерно в 35 раз меньше времени вычислений ОФК при данном значении N. RMSE для ОФК составили: для координат – 0,07 м, для скорости – 0,015 м/с, для ориентации – 0,16°. Накопленная за время моделирования ошибка позиционных координат в горизонтальной плоскости составила 0,054 м, ошибка высоты – 0,073 м.

Проверим, что расчетные СКО фильтра не занижены. На рис. 3 представлено отношение фактической ошибки к расчетному значению 3σ для оценок координат, скорости и ориентации, при различных значениях n_e.

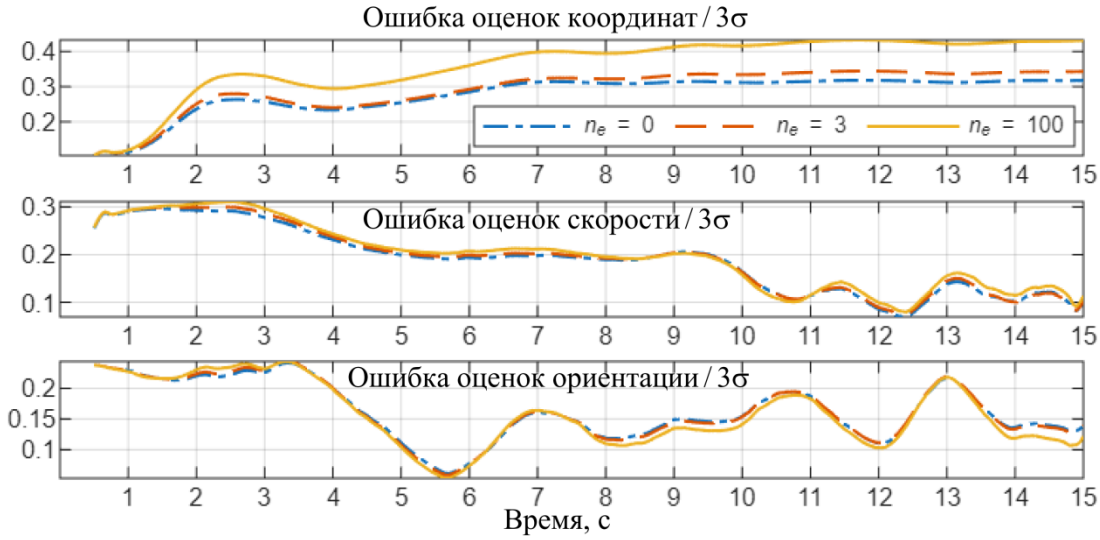


Рис. 3. Отношение ошибок оценок к расчетным значениям 3σ при заданных значениях n_e

Fig. 3. Ratio of estimation errors to the computed 3σ values for given values of n_e

Как видно из данных рис. 3, отношение фактических ошибок оценок к расчетным значениям 3σ меньше единицы, что соответствует правильной работе комплексирующего фильтра. При этом при малых значениях n_e это отношение меньше, чем при больших n_e, что объясняется консервативностью расчетных значений СКО.

2.3. Тестирование ББФК-ВИНС с отслеживанием опорного маркера

Разместим на поверхности сцены опорный маркер со стороной 0,5 м с известным расположением. Отслеживание опорных точек временно отключим. Изменим начальные условия моделирования из предыдущего пункта, задав ненулевыми начальные ошибки оценок позиционных координат угла рыскания подвижного объекта:

$$\Delta r_0 = \left[-1, 1, 0.5\right]^T \text{ м}, \quad \Delta\psi = 40^\circ . \tag{34}$$

Начальные оценки расположения маркера выберем следующие:

$$\begin{aligned} &\hat{\boldsymbol{r}}_{h\,0}^m = \boldsymbol{r}_h^m = \left[0, 0, 0\right]^T , \\ &\hat{\boldsymbol{C}}_{hm\,0} = \exp^{SO(3)}\left(\left[-5, 6, 0\right]^T \cdot \pi/180\right) C_{hm}, \ \boldsymbol{C}_{hm} = \boldsymbol{I}_3 . \end{aligned} \tag{35}$$

В соответствии с (35) ориентация маркера относительно вертикали известна не точно.

Произведем моделирование. На рис. 4–6 представлены действительные и оценочные параметры положения и ориентации подвижного объекта и маркера, а также расчетные диапазоны 3σ, построенные в соответствии с параметрами ковариации комплексирующего фильтра.

Ошибки оценок рис. 4–6 укладываются в расчетные диапазоны 3σ, что подтверждает корректную реализацию модели ошибок.

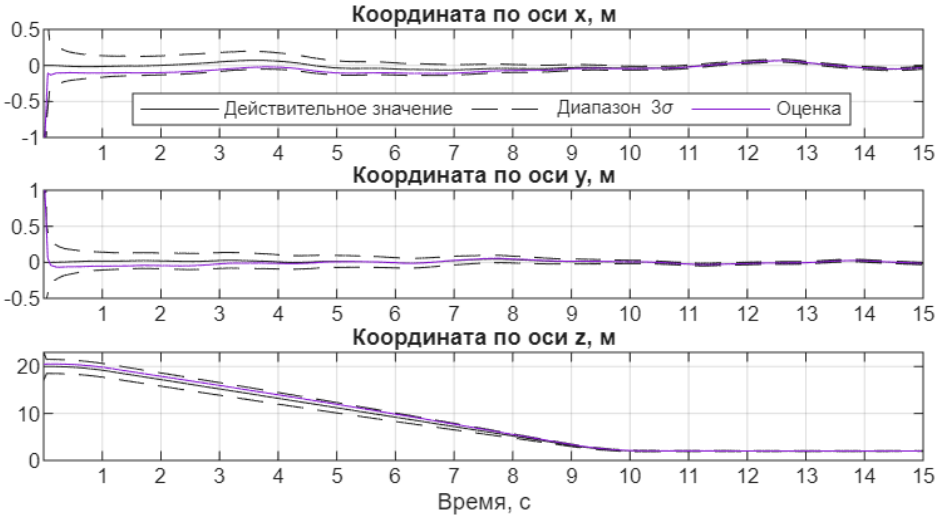


Рис. 4. Оценивание координат при коррекции по опорному маркеру
Fig. 4. Pose estimation during correction using a fiducial marker

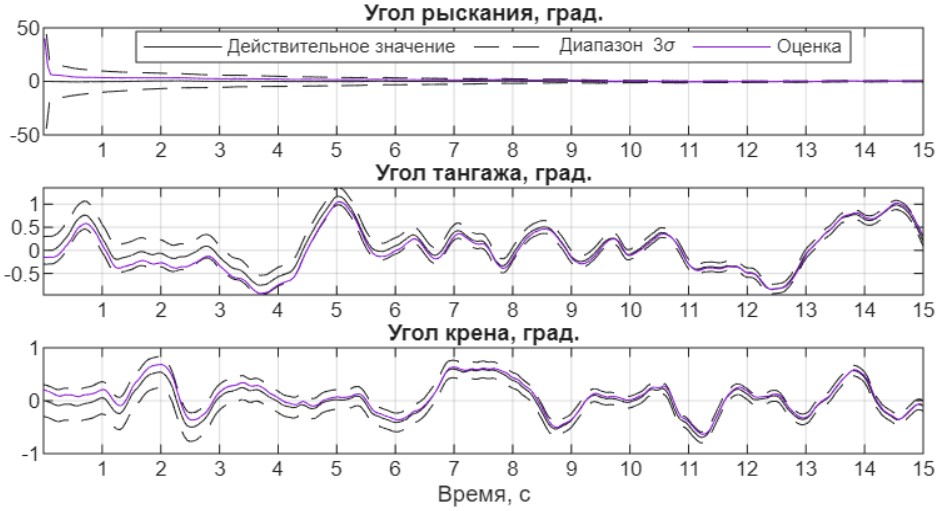


Рис. 5. Оценивание углов Эйлера при коррекции по опорному маркеру
Fig. 5. Estimation of Euler angles during correction using a fiducial marker

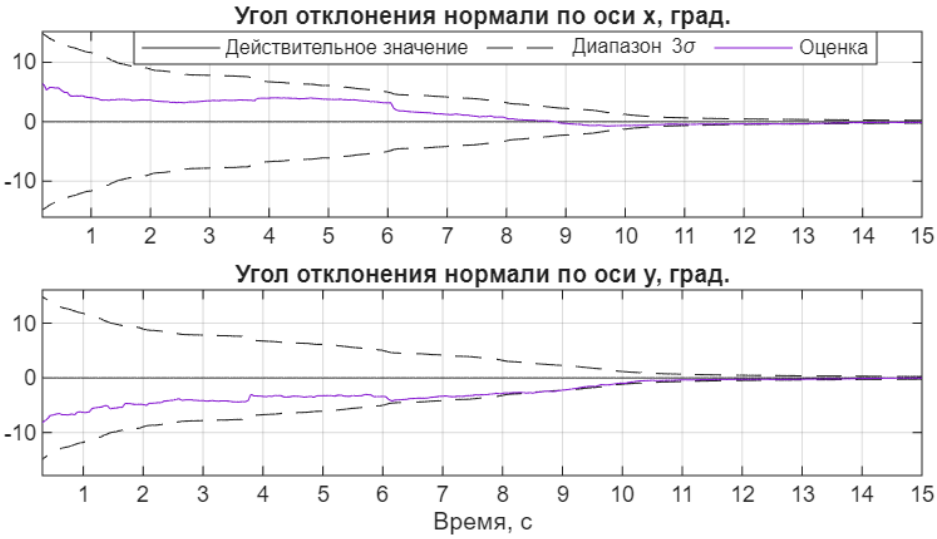


Рис. 6. Оценивание углов наклона нормали маркера при коррекции по опорному маркеру
Fig. 6. Estimation of the marker normal orientation angles during correction using a fiducial marker

2.4. Тестирование ББФК-ВИНС с отслеживанием опорных точек и опорных маркеров

Разместим на поверхности сцены два опорных маркера со стороной 0,5 м и с известным расположением, будем отслеживать на кадрах до 300 опорных точек (рис. 7).

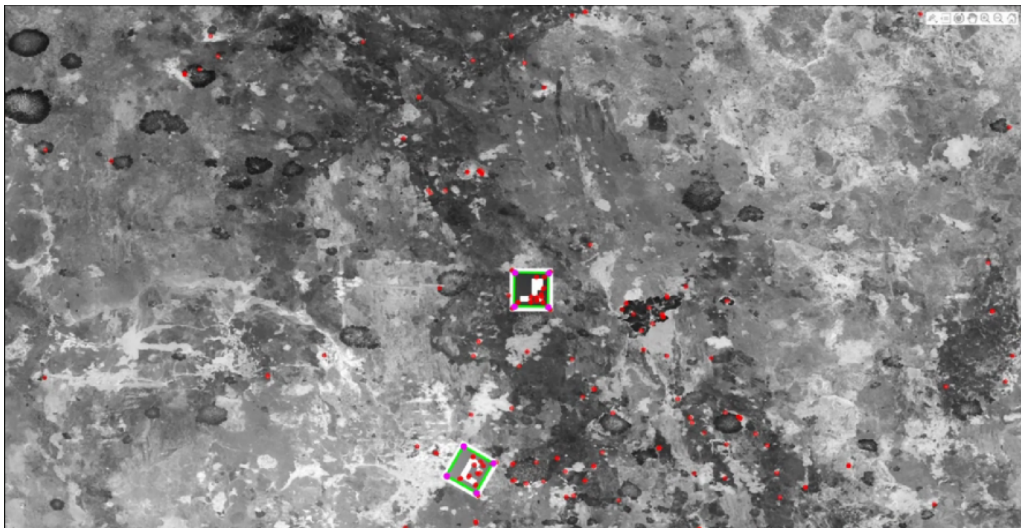


Рис. 7. Кадр сцены с отслеживаемыми опорными точками и опорными маркерами при моделировании спуска подвижного объекта
Fig. 7. Scene frame with tracked point features and fiducial markers during simulation of the vehicle descent

До 7-й секунды моделирования будем использовать коррекцию только по опорным точкам, после – по опорным точкам и маркерам. На рис. 8, 9 представлены действительные и оценочные параметры положения и ориентации подвижного объекта, а также расчетные диапазоны 3σ, построенные в соответствии с параметрами ковариации комплексирующего фильтра.

Как видно из рис. 8, 9 сброс начальной неопределенности оценок позиционных координат и угла рыскания происходит только по данным маркера с известным положением, что свидетельствует о том, что разработанные модели ошибок обеспечивают консистентность рекуррентного фильтра ВИНС.

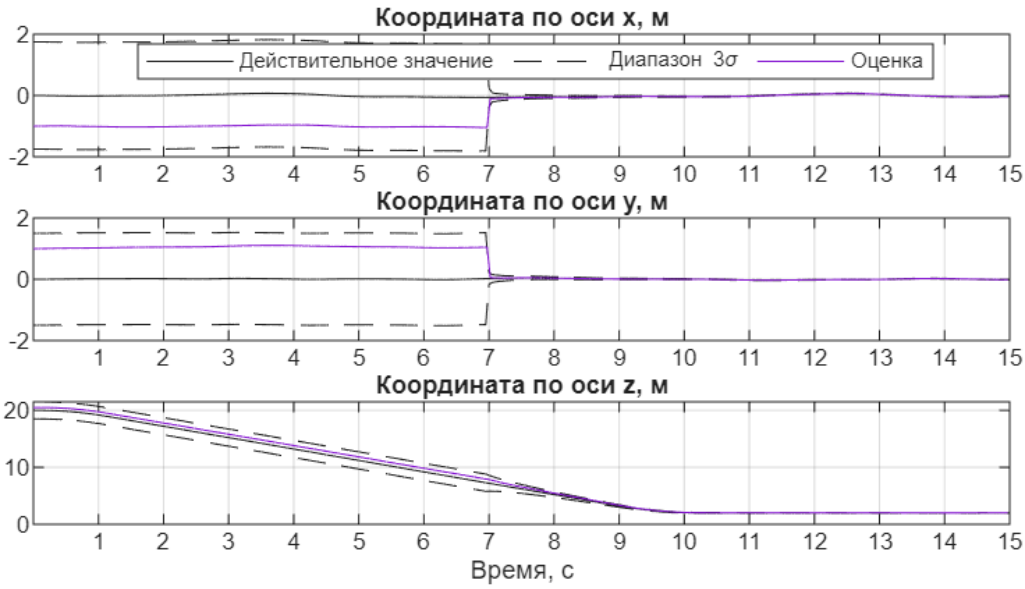


Рис. 8. Оценивание координат при коррекции по опорным точкам и опорным маркерам
Fig. 8. Pose estimation during correction using point features and fiducial markers

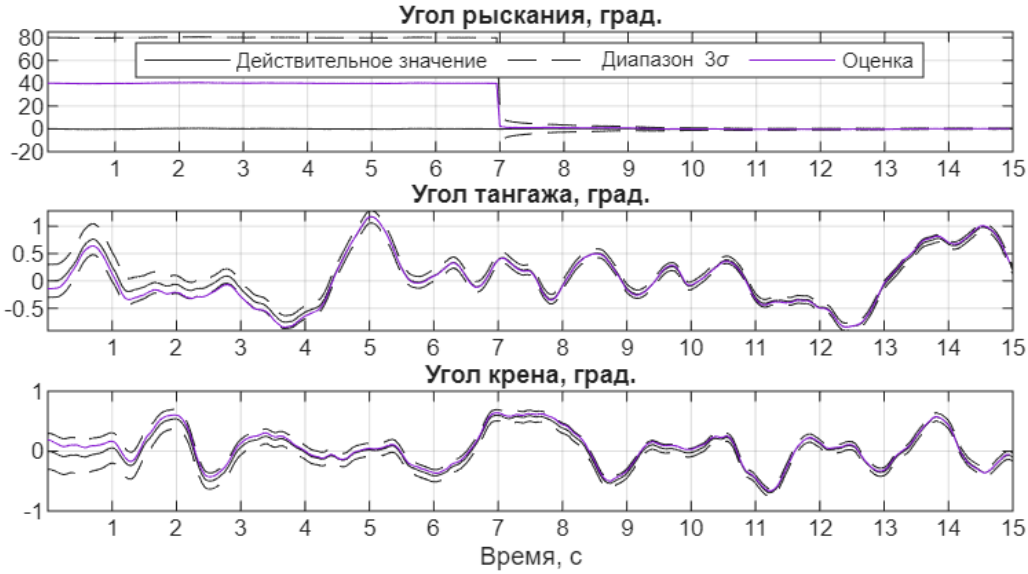


Рис. 9. Оценивание углов Эйлера при коррекции по опорным точкам и опорным маркерам
Fig. 9. Estimation of Euler angles during correction using point features and fiducial markers

Заключение

Разработаны математические модели для монокулярной ББФК-ВИНС с опорными точками с параметризацией обратной глубины и опорными маркерам типа Aruco, используемыми в качестве ориентиров. Модели сформулированы относительно право-инвариантных ошибок, что позволило устранить ложную наблюдаемость ошибок оценивания абсолютных позиционных координат и угла рыскания, обеспечить оценивание в условиях большой начальной неопределенности оценок. Алгоритм ББФК продемонстрировал эффективность в применении к ВИНС с разработанными моделями ошибок, формируя оценки, близкие к оценкам ОФК, но при существенно меньшем времени вычислений. Эти свойства подтверждены в рамках численного моделирования работы ВИНС на этапе посадки, использующей данные KLT-трекера опорных точек и детектора Aruco-маркеров. Перспективы дальнейшей работы связаны с рассмотрением более сложных и продолжительных сценариев движения.

Список литературы

1. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. Изд. 4-е, испр. и доп. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2025. 498 с. ISBN 978-5-91995-105-6.

2. Куликова М.В., Куликов Г.Ю. Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 4. С. 64–98.

3. An Invariant-EKF VINS Algorithm for Improving Consistency / K. Wu, T. Zhang, D. Su et al. // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, Canada, 2017. P. 1578–1585. DOI: 10.1109/IROS.2017.8205965

4. Camera-IMU-based localization: Observability analysis and consistency improvement / J.A. Hesch, D.G. Kottas, S.L. Bowman, S.I. Roumeliotis // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 33, no. 1. P. 182–201. DOI: 10.1177/0278364913509675

5. Huang G.P., Mourikis A.I., Roumeliotis S.I. Observability-based Rules for Designing Consistent EKF SLAM Estimators // The International Journal of Robotics Research. 2009. Vol. 29, no. 5. P. 502–528. DOI: 10.1177/0278364909353640

6. Huang G. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, 2019. P. 9572–9582. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793604

7. Mourikis A.I., Roumeliotis S.I. A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, 2007. P. 3565–3572. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.364024

8. Mourikis A.I. Characterization and optimization of the accuracy of mobile robot localization: PhD thesis. Minneapolis: University of Minnesota, 2008. 210 p.

9. Li M., Mourikis A.I. Improving the accuracy of EKF-based visual-inertial odometry // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, USA, 2012. P. 828–835. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225229

10. A Square Root Inverse Filter for Efficient Vision-Aided Inertial Navigation on Mobile Devices / K.J. Wu, A.M. Ahmed, G.A. Georgiou, S.I. Roumeliotis // Robotics: Science and Systems Conference (RSS). 2015. DOI: 10.15607/RSS.2015.XI.008

11. Huai Z., Huang G. Robocentric visual-inertial odometry // The International Journal of Robotics Research. 2019. Vol. 41, no. 7. P. 667–689. DOI: 10.1177/0278364919853361

12. Civera J., Davison A.J., Montiel J.M.M. Inverse Depth Parametrization for Monocular SLAM // IEEE Transactions on Robotics. 2008. Vol. 24, no. 5. P. 932–945. DOI: 10.1109/TRO.2008.2003276

13. Civera J., Davison A.J., Montiel J.M.M. Inverse Depth to Depth Conversion for Monocular SLAM // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, 2007. P. 2778–2783. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363892

14. Imre E., Berger M.-O., Noury N. Improved Inverse-Depth Parameterization for Monocular Simultaneous Localization and Mapping // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, 2009. P. 381–386. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152481

15. Ammann N., Mayo L.G. Undelayed Initialization of Inverse Depth Parameterized Landmarks in UKF-SLAM with Error State Formulation // 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Auckland, 2018. P. 918–923. DOI: 10.1109/AIM.2018.8452375

16. Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback / M. Bloesch, M. Burri, S. Omari et al. // The International Journal of Robotics Research. 2017. Vol. 36, no. 10. P. 1053–1072, DOI: 10.1177/0278364917728574

17. Barrau A., Bonnabel S. Invariant Kalman Filtering // Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. 2018. Vol. 1. P. 237–257. DOI: 10.1146/annurev-control-060117-105010

18. Barrau A., Bonnabel S. An EKF-SLAM Algorithm with Consistency Properties // arXiv preprint. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1510.06263

19. Iterated Invariant Extended Kalman Filter (IIEKF) / S. Goffin, A. Barrau, S. Bonnabel et al. // arXiv preprint. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2404.10665

20. A Right Invariant Extended Kalman Filter for Object based SLAM / Y. Song, Z. Zhang, J. Wu et al. // IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. Vol. 7, no. 2. P. 1348–1355. DOI: 10.1109/LRA.2021.3139370

21. Kaess M., Ranganathan A., Dellaert F. iSAM: Fast Incremental Smoothing and Mapping with Efficient Data Association // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, 2007. P. 1670–1677. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363563

22. Степанов О.А., Моторин А.В., Золотаревич В.П. Алгоритмы байесовского оценивания в задаче одновременной навигации и картографирования // XXXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 03–04 июня 2025 года: сб. материалов конф. СПб.: АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2025. С. 7–11. EDN DESIAG.

23. Romero-Ramirez F.J., Muñoz-Salinas R., Medina-Carnicer R. Speeded up detection of squared fiducial markers // Image and Vision Computing. 2018. Vol. 76. P. 38–47. ISSN 0262-8856. DOI: 10.1016/j.imavis.2018.05.004

24. Циоплиакис Н.И. Быстрый блочный LD-фильтр Калмана для задач визуально-инерциальной навигации // XXXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 03–04 июня 2025 года: сб. материалов конф. СПб.: АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2025. С. 63–64. EDN YFSXYE.

25. Absil P.A., Baker C.G., Gallivan K.A. Trust-Region Methods on Riemannian Manifolds // Foundations of Computational Mathematics. 2007. Vol. 7, no. 3. P. 303–330. DOI: 10.1007/s10208-005-0179-9

26. Complete Solution Classification for the Perspective-Three-Point Problem / X.S. Gao, X.R. Hou, J. Tang, H.F. Cheng // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. Vol. 25, no. 8. P. 930–943. DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1217599

27. Bell B.M., Cathey F.W. The Iterated Kalman Filter Update as a Gauss-Newton Method // IEEE Transactions on Automatic Control. 1993. Vol. 38, no. 2. P. 294–297. DOI: 10.1109/9.250476

References

1. Stepanov O.A. *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoy informatsii. Ch. 1. Vvedeniye v teoriyu otsenivaniya* [Fundamentals of Estimation Theory with Applications to Navigation Information Processing Problems. Part 1. Introduction to Estimation Theory]. 4th ed., corrected and augmented. St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2025. 498 p. (In Russ.) ISBN 978-5-91995-105-6.

2. Kulikova M.V., Kulikov G.Yu. Numerical methods for nonlinear filtering of signals and measurements. *Computational technologies = Vychislitel'nye tekhnologii*. 2016;21(4):64–98. (In Russ.)

3. Wu K., Zhang T., Su D., Huang S., Dissanayake G. An Invariant-EKF VINS Algorithm for Improving Consistency. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Vancouver, BC, Canada, 2017. P. 1578–1585. DOI: 10.1109/IROS.2017.8205965

4. Hesch J.A., Kottas D.G., Bowman S.L., Roumeliotis S.I. Camera-IMU-based localization: Observability analysis and consistency improvement. *The International Journal of Robotics Research*. 2013;33(1):182–201. DOI: 10.1177/0278364913509675

5. Huang G.P., Mourikis A.I., Roumeliotis S.I. Observability-based Rules for Designing Consistent EKF SLAM Estimators. *The International Journal of Robotics Research*. 2009;29(5):502–528. DOI: 10.1177/0278364909353640

6. Huang G. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, 2019. P. 9572–9582. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793604

7. Mourikis A.I., Roumeliotis S.I. A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome, 2007. P. 3565–3572. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.364024

8. Mourikis A.I. *Characterization and optimization of the accuracy of mobile robot localization: PhD thesis*. Minneapolis: University of Minnesota, 2008. 210 p.

9. Li M., Mourikis A.I. Improving the accuracy of EKF-based visual-inertial odometry. In: *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Saint Paul, MN, USA, 2012. P. 828–835. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225229

10. Wu K.J., Ahmed A.M., Georgiou G.A., Roumeliotis S.I. A Square Root Inverse Filter for Efficient Vision-Aided Inertial Navigation on Mobile Devices. In: *Robotics: Science and Systems Conference (RSS)*. 2015. DOI: 10.15607/RSS.2015.XI.008

11. Huai Z., Huang G. Robocentric visual-inertial odometry. *The International Journal of Robotics Research*. 2019;41(7):667–689. DOI: 10.1177/0278364919853361

12. Civera J., Davison A.J., Montiel J.M.M. Inverse Depth Parametrization for Monocular SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*. 2008;24(5):932–945. DOI: 10.1109/TRO.2008.2003276

13. Civera J., Davison A.J., Montiel J.M.M. Inverse Depth to Depth Conversion for Monocular SLAM. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome, 2007. P. 2778–2783. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363892

14. Imre E., Berger M.-O., Noury N. Improved Inverse-Depth Parameterization for Monocular Simultaneous Localization and Mapping. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, 2009. P. 381–386. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152481

15. Ammann N., Mayo L.G. Undelayed Initialization of Inverse Depth Parameterized Landmarks in UKF-SLAM with Error State Formulation. In: *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Auckland, 2018. P. 918–923. DOI: 10.1109/AIM.2018.8452375

16. Bloesch M., Burri M., Omari S., Hutter M., Siegwart R. Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback. *The International Journal of Robotics Research*. 2017;36(10):1053–1072. DOI: 10.1177/0278364917728574

17. Barrau A., Bonnabel S. Invariant Kalman Filtering. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018;1:237–257. DOI: 10.1146/annurev-control-060117-105010

18. Barrau A., Bonnabel S. An EKF-SLAM Algorithm with Consistency Properties. *arXiv preprint*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1510.06263

19. Goffin S., Barrau A., Bonnabel S., Bruls O., Sacré P. Iterated Invariant Extended Kalman Filter (IIEKF). *arXiv preprint*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2404.10665

20. Song Y., Zhang Z., Wu J., Wang Y., Zhao L., Huang S. A Right Invariant Extended Kalman Filter for Object based SLAM. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021;7(2):1348–1355. DOI: 10.1109/LRA.2021.3139370

21. Kaess M., Ranganathan A., Dellaert F. iSAM: Fast Incremental Smoothing and Mapping with Efficient Data Association. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome, 2007. P. 1670–1677. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363563

22. Stepanov O.A., Motorin A.V., Zolotarevich V.P. [Bayesian estimation algorithms in the problem of simultaneous navigation and mapping]. In: *XXXII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, June 3–4, 2025: conference proceedings*. St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2025. P. 7–11. (In Russ.) EDN DESIAG.

23. Romero-Ramirez F.J., Muñoz-Salinas R., Medina-Carnicer R. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing*. 2018;76:38–47. ISSN 0262-8856. DOI: 10.1016/j.imavis.2018.05.004

24. Tsiopliakis N.I. [Fast block LD Kalman filter for visual-inertial navigation problems]. In: *XXXII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, June 3–4, 2025: conference proceedings*. St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2025. P. 63–64. (In Russ.) EDN YFSXYE.

25. Absil P.A., Baker C.G., Gallivan K.A. Trust-Region Methods on Riemannian Manifolds. *Foundations of Computational Mathematics*. 2007;7(3):303–330. DOI: 10.1007/s10208-005-0179-9

26. Gao X.S., Hou X.R., Tang J., Cheng H.F. Complete Solution Classification for the Perspective-Three-Point Problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2003;25(8):930–943. DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1217599

27. Bell B.M., Cathey F.W. The Iterated Kalman Filter Update as a Gauss-Newton Method // IEEE Transactions on Automatic Control. 1993. Vol. 38, no. 2. P. 294–297. DOI: 10.1109/9.250476

Информация об авторах

Шестаков Александр Леонидович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a.l.shestakov@susu.ru.

Циоплиакис Николаос Илиас, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ntsiopliakis@mail.ru.

Information about the authors

Alexander L. Shestakov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Information and Measurement Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a.l.shestakov@susu.ru.

Nikolaos I. Tsiopliakis, Postgraduate student of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ntsiopliakis@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.10.2025
The article was submitted 21.10.2025

Научная статья
УДК 621.391:621.396
DOI: 10.14529/ctcr260105

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ГНСС НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ЭТАПЕ ПОСАДКИ

С.С. Лысов, *lysovss@susu.ru*
Н.В. Дударев, *dudarevnv@susu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8374-5435*
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Полетные миссии требуют высокой точности управления аппаратом, особенно на этапах взлета и посадки. Это во многом относится к рассмотрению влияния размещения антенн ГНСС на цилиндрическом корпусе ЛА и связанной с этим точности определения углового положения, что критически важно для успешного выполнения миссии. **Цель работы:** повышение точности определения углового положения (крена, тангажа и рыскания) летательного аппарата на критичных этапах полета, таких как посадка, за счет оптимизации взаимного расположения антенн спутниковой навигационной системы на его цилиндрическом корпусе. Исследование направлено на минимизацию влияния шума измерений координат на результирующую ошибку вычисления углов ориентации. **Материалы и методы.** Для решения задачи оптимизации применялись и сравнивались два алгоритма: «жадный» алгоритм, направленный на выбор максимально удаленных друг от друга точек размещения, и RANSAC-алгоритм, основанный на устойчивой выборке случайных подмножеств. Критерием оптимизации служила минимизация стандартного отклонения ошибки определения углов Эйлера. Эффективность полученных конфигураций оценивалась методом статистического моделирования со 100 итерациями для различных уровней шума координат. Зависимость ошибки ориентации от ошибки позиционирования анализировалась с помощью линейной регрессии и коэффициента детерминации. Проведено сравнение коэффициентов передачи шума с теоретической оценкой для неоптимизированного размещения. **Результаты.** Проведено сравнение «жадного» алгоритма оптимизации размещения антенн приемников ГНСС и RANSAC-алгоритма. Найдена наилучшая конфигурация, обеспечивающая снижение коэффициента передачи по сравнению с теоретической оценкой. Выявлена близкая к линейной зависимость ошибки определения углов от ошибки измерения координат. **Заключение.** Показана важность оптимизации взаимного расположения приемников для точного определения ориентации летательного аппарата. Наиболее эффективным и надежным методом для размещения приемников на цилиндрическом корпусе признан «жадный» алгоритм. Его применение позволяет существенно повысить точность определения углового положения на этапах полета, чувствительных к ошибкам ориентации, таких как взлет и посадка. Результаты работы формируют практические рекомендации для повышения надежности систем ориентации.

Ключевые слова: радионавигация, угловое положение, глобальные навигационные спутниковые системы, летательный аппарат, алгоритмы оптимизации, посадка, шум измерений

Благодарности. Работа проводилась в рамках государственного задания № FENU-2024-0004 (2024024ГЗ).

Для цитирования: Лысов С.С., Дударев Н.В. Влияние взаимного расположения приемников ГНСС на точность определения углового положения летательного аппарата на этапе посадки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 61–71. DOI: 10.14529/ctcr260105

© Лысов С.С., Дударев Н.В., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260105

THE EFFECT OF THE RELATIVE POSITION OF THE GNSS RECEIVERS ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE ANGULAR POSITION OF THE AIRCRAFT AT THE LANDING STAGE

***S.S. Lysov**, lysovss@susu.ru*
***N.V. Dudarev**, dudarevnv@susu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8374-5435*
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Flight missions require high precision control of the vehicle, especially during the takeoff and landing stages. This largely relates to the consideration of the influence of the placement of GNSS antennas on the cylindrical body of the aircraft and the associated accuracy of determining the angular position, which is critically important for the successful completion of the mission. **The purpose of the work.** Improving the accuracy of determining the angular position (roll, pitch and yaw) of an aircraft at critical stages of flight, such as landing, by optimizing the relative position of the satellite navigation system antennas on its cylindrical body. The research is aimed at minimizing the effect of coordinate measurement noise on the resulting error in calculating orientation angles. **Materials and methods.** To solve the optimization problem, two algorithms were used and compared: a "greedy" algorithm aimed at selecting the most distant placement points from each other, and a RANSAC algorithm based on a stable sample of random subsets. The optimization criterion was the minimization of the standard deviation of the error in determining the Euler angles. The effectiveness of the obtained configurations was evaluated by statistical modeling with 100 iterations for various levels of coordinate noise. The dependence of the orientation error on the positioning error was analyzed using linear regression and the coefficient of determination. The noise transmission coefficients are compared with the theoretical estimate for an unoptimized placement. **Results.** A comparison is made between the "greedy" algorithm for optimizing the placement of GNSS receiver antennas and the RANSAC algorithm. The best configuration has been found, providing a reduction in the transmission coefficient compared to the theoretical estimate. A close to linear dependence of the error in determining angles on the error in measuring coordinates has been revealed. **Conclusion.** The importance of optimizing the relative position of the receivers for accurately determining the orientation of the aircraft is shown. The "greedy" algorithm is recognized as the most effective and reliable method for placing receivers on a cylindrical body. Its use makes it possible to significantly improve the accuracy of determining the angular position at flight stages sensitive to orientation errors, such as takeoff and landing. The results of the work form practical recommendations for improving the reliability of orientation systems.

Keywords: radio navigation, angular position, global navigation satellite systems, aircraft, optimization algorithms, landing, measurement noise

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of state assignment No. FENU-2024-0004 (2024024GZ).

For citation: Lysov S.S., Dudarev N.V. The effect of the relative position of the GNSS receivers on the accuracy of determining the angular position of the aircraft at the landing stage. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):61–71. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260105

Введение

Современные аэрокосмические задачи предъявляют исключительно высокие требования к точности и надежности управления полетом. Ключевым аспектом их успешного решения является непрерывный и высокоточный мониторинг параметров движения аппарата. В частности, наибольшее внимание к отслеживанию и мониторингу состояния летательного аппарата (ЛА) требуется на этапах взлета и посадки. Наряду с определением местоположения критически важным становится знание углового положения (ориентации) ЛА в пространстве, описываемого углами крена, тангажа и рыскания. Точность определения этих параметров напрямую влияет на эффективность работы системы управления, корректность выполнения маневров, расход топлива и, в конечном счете, на успех всей миссии [1, 2].

Основным инструментом для решения навигационных задач на этапах взлета и посадки является глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС). Однако стандартные ГНСС-приемники предоставляют данные исключительно о координатах и скорости своей антенны, что недостаточно для полноценного определения ориентации объекта. Для получения информации об угловом положении применяются функциональные дополнения, а именно – алгоритмы пространственного кинематического позиционирования, использующие данные с нескольких антенн, жестко закрепленных на корпусе летательного аппарата. Взаимное расположение этих антенн формирует так называемые базы, анализ разности фаз сигналов или их квазидальностей на которых позволяет с высокой точностью вычислить углы ориентации аппарата.

Точность определения углового положения оказывается в прямой зависимости от двух основных факторов: уровня шумов измерений координат самими приемниками и геометрического фактора – взаимного расположения этих приемников на конструкции ракеты-носителя [3]. Данное исследование посвящено анализу второго фактора. В работе моделируется влияние различных конфигураций размещения антенн ГНСС на цилиндрическом корпусе ракеты-носителя на итоговую точность оценивания ее углов Эйлера, что является критически важным для обеспечения надежного контроля на этапах взлета и посадки летательных аппаратов [4].

Моделирование расположения приемников ГНСС на борту ЛА

Тело ЛА, на котором можно разместить приемники ГНСС, в приближении можно рассматривать как цилиндр. Возьмем в качестве примера цилиндр радиуса 275 см и длины 3000 см.

На борту ЛА необходимо расположить 3 приемника ГНСС в заранее определенных точках таким образом, чтобы расстояние между любыми двумя соседними приемниками ГНСС, называемое базой, было больше среднеквадратичного отклонения (СКО) измерений по всем трех координатам, и при этом три приемника не должны находиться на одной линии (рис. 1a, b) [5]. В примерах на рис. 1 приемники *A*, *B*, *C* образуют базы *AB*, *BC*, *CA* и векторную плоскость *S*.

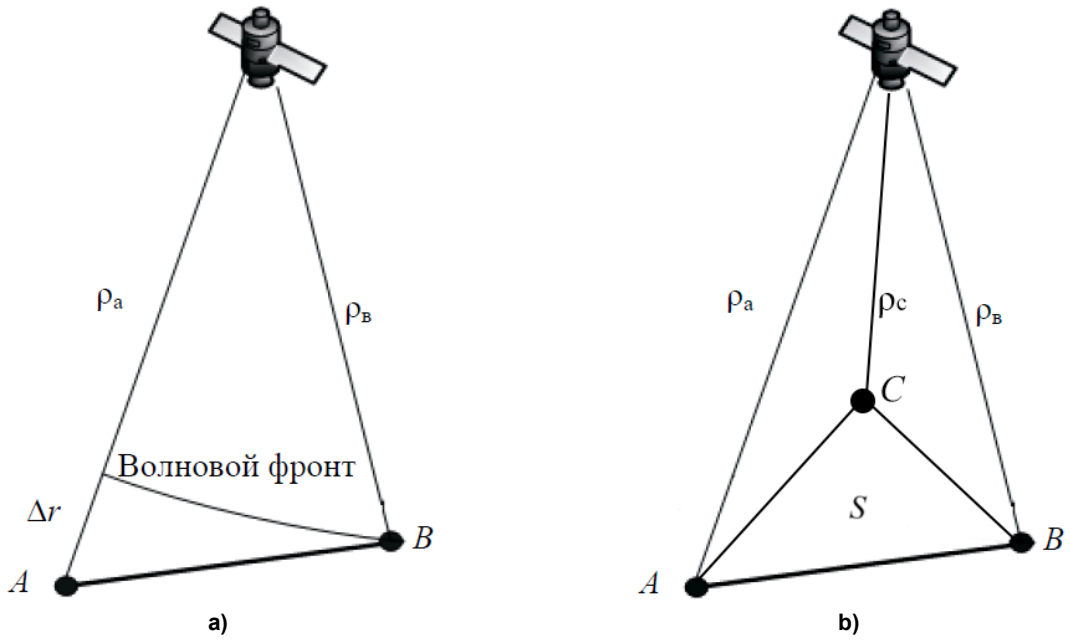


Рис. 1. Базы приемников: a – база двух приемников; b – базы трех приемников
Fig. 1. Axis of receivers: a – axis of two receivers; b – axis of three receivers

Тогда необходимо подобрать базы трех приемников таким образом, чтобы они давали наименьшую погрешность в определении угловых положений ЛА, то есть углов Эйлера [6]. Для этого необходимо применить алгоритмы оптимизации размещения приемников ГНСС на поверхности тела ЛА с критерием оптимизации – наименьшее влияние шума определения координат на шум определения углов Эйлера:

$$\sigma_{\varphi,\gamma,\theta} = f\left(\sigma_{x,y,z}\right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\sigma_{\varphi,\gamma,\theta}$ – СКО шума определения углов Эйлера ЛА; $\sigma_{x,y,z}$ – СКО шума определения координат приемников ГНСС в системе координат ENU: East – Восток (координата x), North – Север (координата y), Up – Верх (координата z).

Были применены два алгоритма: «жадный» алгоритм и RANSAC-алгоритм. В результате были подобраны по три точки на теле ЛА, где будет наилучшим образом выполняться критерий (1).

Описание «жадного» алгоритма [7, 8].

Требуется выбрать три неколлинеарные опорные точки, максимально удаленные друг от друга.

Алгоритмические шаги:

1. Выбор первой точки A. Берется точка с минимальной координатой x:

$$A = \arg(\min_i(x_i)), \tag{2}$$

где x_i – координата i-й точки перебора; arg(min($f(x)$) – значение минимума функции.

2. Выбор второй точки B. Берется наиболее удаленная от первой точки A точка:

$$B = \arg\left(\max_i(\|p_i - p_A\|\right), \tag{3}$$

где p_i – координаты i-й точки перебора; p_A – координаты точки A; arg(max($f(x)$) – значение максимума функции.

3. Выбор третьей точки C. Выбирается точка, которая, во-первых, максимизирует минимальное расстояние до первых двух точек, во-вторых, неколлинеарна с ними:

$$C = \arg\left(\max_{i\notin\{A,B\}}\left(\min(\|p_i - p_A\|, \|p_i - p_B\|)\right)\right)\Bigg|_{\|p_B - p_A\|\times\|p_i - p_A\|>10^{-6}}, \tag{4}$$

где p_B – координаты точки B.

Описание алгоритма RANSAC [9].

Требуется найти тройку точек, которая дает наилучшее совмещение с шумными данными через максимизацию числа инлайеров.

Инлайеры – это точки, для которых евклидово расстояние между преобразованной точкой N и ее зашумленной версией меньше заданного порога τ:

$$\left\|R(p_i - N_{\text{оп}}) + N_{\text{шум}} - q_i\right\| < \tau, \tag{5}$$

где τ – заданный порог. В работе принимается равным 5 как единица шага полигональной сетки тела ЛА; $N_{\text{оп}}$ – опорная точка; $N_{\text{шум}}$ – зашумленная точка; R – матрица поворота; p_i – преобразованная матрицей поворота точка $N_{\text{оп}}$; q_i – преобразованная матрицей поворота точка $N_{\text{шум}}$.

Алгоритмические шаги:

1. Для каждой итерации $k = \{1, \ldots, N\}$ случайно выбирается тройка точек $T_k = \{i, j, l\}$, где i, j, l – значения x, y, z точки T_k в системе координат ENU.

2. С помощью алгоритма Кабсха вычисляется матрица поворота R_k между опорными точками p_i, p_j, p_l и зашумленными точками q_i, q_j, q_l [10]:

$$N_{\text{оп}} = \frac{1}{3}\sum_{\tau\in T_k} p_\tau; \tag{6}$$

$$N_{\text{шум}} = \frac{1}{3}\sum_{\tau\in T_k} q_\tau; \tag{7}$$

$$H = \sum_{\tau\in T_k}(p_\tau - N_{\text{оп}})\left(q_\tau - N_{\text{шум}}\right)^T; \tag{8}$$

$$H = U\Sigma V^T; \tag{9}$$

$$R = VU^T|_{\det(R)\neq -1}; \tag{10}$$

$$R = V\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & \det(VU^T)\end{pmatrix}U^T\Bigg|_{\det(R)=-1}. \tag{11}$$

(6), (7) – центрирование точек;

(8) – ковариационная матрица H;

(9) – SVD-разложение ковариационной матрицы H на матрицы U, Σ, V;

(10), (11) – вычисление матрицы поворота R.

3. Оценка инлайеров и сохранение троек точек с наибольшим числом инлайеров:

$$q_i^{'} = R(p_i - N_{\text{оп}}) + N_{\text{шум}}; \quad (12)$$

$$I = \sum_{i=1}^{n}\left(\left\|q_i^{'} - q_i\right\| < \tau\right), \quad (13)$$

где $q_i^{'}$ – преобразованная зашумленная i-я точка; I – инлайер.

При моделировании бралось тело ЛА, поверхность которого была представлена в виде массива точек.

При применении двух алгоритмов, «жадного» и RANSAC, к телу ЛА получены две картины расположения приемников ГНСС (рис. 2a, b).

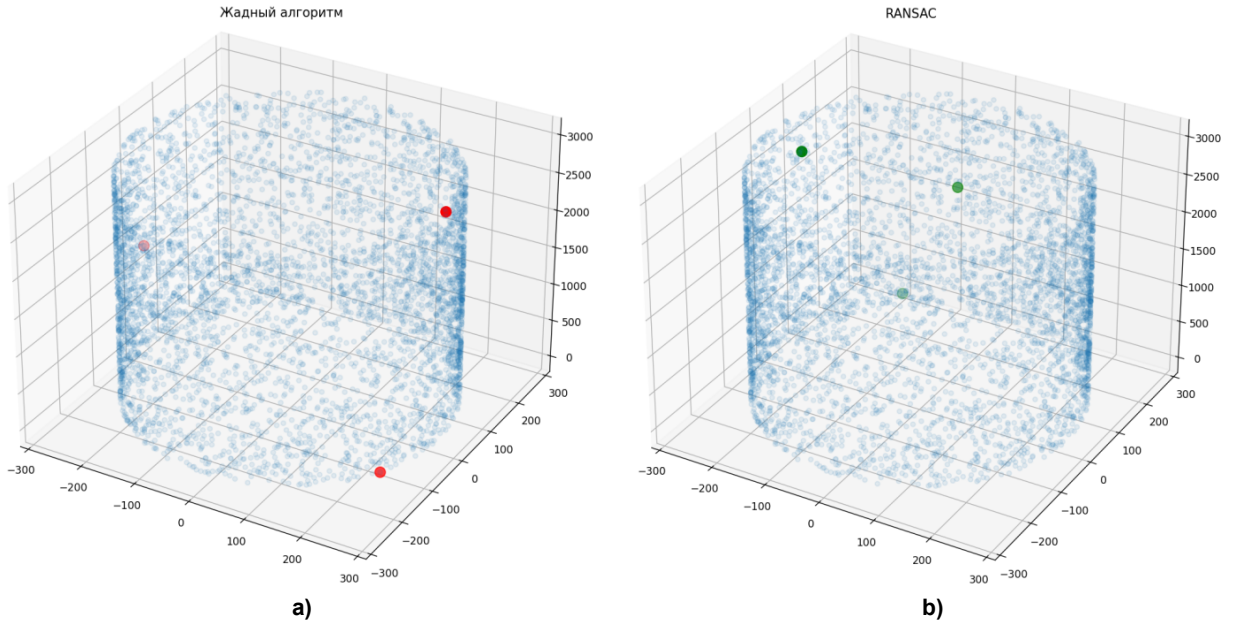


Рис. 2. Применение алгоритмов оптимизации размещения приемников ГНСС: a – применение «жадного» алгоритма; b – применение RANSAC-алгоритма
Fig. 2. Application of algorithms for optimizing the placement of GNSS receivers: a – application of the “greedy” algorithm; b – application of the RANSAC algorithm

Тогда можно сравнить СКО ошибки определения углов Эйлера ЛА после применения данных алгоритмов (рис. 3).

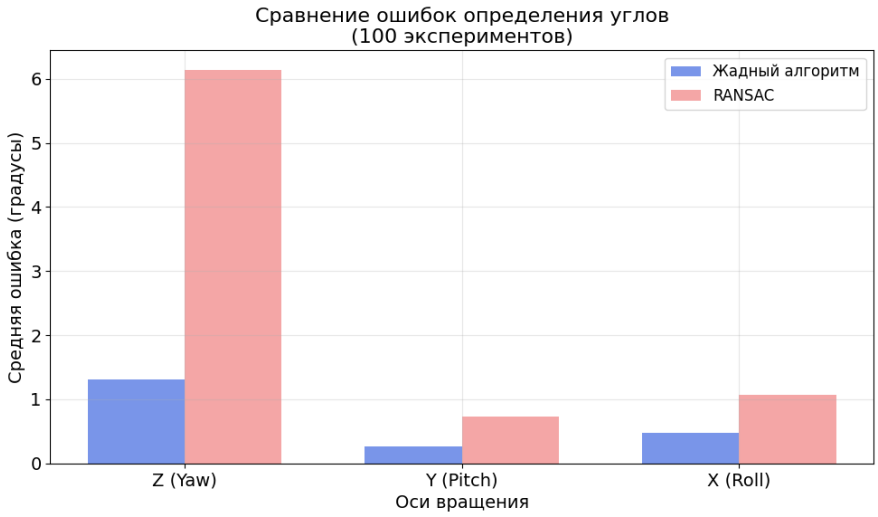


Рис. 3. Сравнение ошибок определения углов Эйлера ЛА после применения «жадного» алгоритма и RANSAC-алгоритма
Fig. 3. Comparison of errors in determining Euler angles after applying the “greedy” algorithm and the RANSAC algorithm

Путем компьютерного моделирования после ста применений двух алгоритмов было выяснено, что «жадный» алгоритм достаточно устойчив и показывает схожие друг с другом результаты, в то время как RANSAC-алгоритм абсолютно неустойчив и каждый раз выдает абсолютно разные и непредсказуемые результаты выбора трех точек для размещения приемников ГНСС. Более того, СКО ошибки определения углов Эйлера у «жадного» алгоритма в абсолютном большинстве случаев ниже, чем у RANSAC-алгоритма, а разброс значений данных СКО у «жадного» алгоритма в абсолютном большинстве случаев гораздо меньше, чем у RANSAC [11].

На основании выводов после многократного применения двух алгоритмов можно выдвинуть гипотезу о том, что неустойчивость RANSAC-алгоритма в данном случае связана с отсутствием выраженных особенностей геометрии на цилиндре, которым в исследовании приближают тело ЛА. «Жадный» алгоритм, напротив, использует глобальные геометрические свойства поверхности, что делает его более стабильным в таких условиях.

Таким образом, в данных условиях наиболее применим «жадный» алгоритм нахождения точек для крепления приемников ГНСС на борту ЛА. Его следует использовать в работе. Дальнейшие операции с алгоритмами определения углового положения ЛА в пространстве будут происходить после применения именно «жадного» алгоритма.

Нахождение зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат

Далее требуется определить и аппроксимировать влияние шума определения координат приемников на СКО шума определения углов Эйлера. Также нахождение данной зависимости поможет оценить, как работает алгоритм нахождения оптимального расположения приемников ГНСС и каков его результат [12].

Для каждого уровня СКО шума определения координат приемников ГНСС просчитывается среднее значение СКО шума определения углов Эйлера на 100 итераций:

$$\overline{\sigma_{\varphi,\gamma,\theta}} = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{100} f_i\left(\sigma_{x,y,z}\right), \tag{14}$$

где $\overline{\sigma_{\varphi,\gamma,\theta}}$ – среднее СКО шума определения углов Эйлера ЛА; i – итерация.

СКО шума определения углов Эйлера вычисляется по формуле [13]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{100}(\Phi_i)^2}, \tag{15}$$

где Φ_i – i-й угол Эйлера.

Аппроксимация зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат вычисляется по методу линейной регрессии с параметрами k и b на основе метода наименьших квадратов. Этот метод минимизирует сумму квадратов отклонений между наблюдаемыми значениями y и предсказанными значениями y', используя ковариацию между x и y и дисперсию их массивов, которые вычисляются по формуле [14]

$$y' = kx + b; \tag{16}$$

$$b = y' - kx', \tag{17}$$

где x' – среднее значение массива значений x; y' – среднее значение массива значений y.

Линейность определенной выше зависимости численно выражается с помощью коэффициента детерминации R^2, равного квадрату коэффициента корреляции r [15]:

$$R^2 = r^2 = \left(\frac{\mathrm{Cov}(x,y)}{\sqrt{\mathrm{Var}(x)\cdot\mathrm{Var}(y)}}\right)^2. \tag{18}$$

Принято считать значение коэффициента детерминации $R^2 \geq 0{,}98$ достаточным для констатации линейности зависимости x от y [16].

Зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат, линейной регрессии и коэффициента детерминации представлены на рис. 4.

Анализ рис. 4 показывает, что полученные во время моделирования данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, коэффициент детерминации построенных регрессионных моделей составляет $R^2 \geq 0{,}98$.

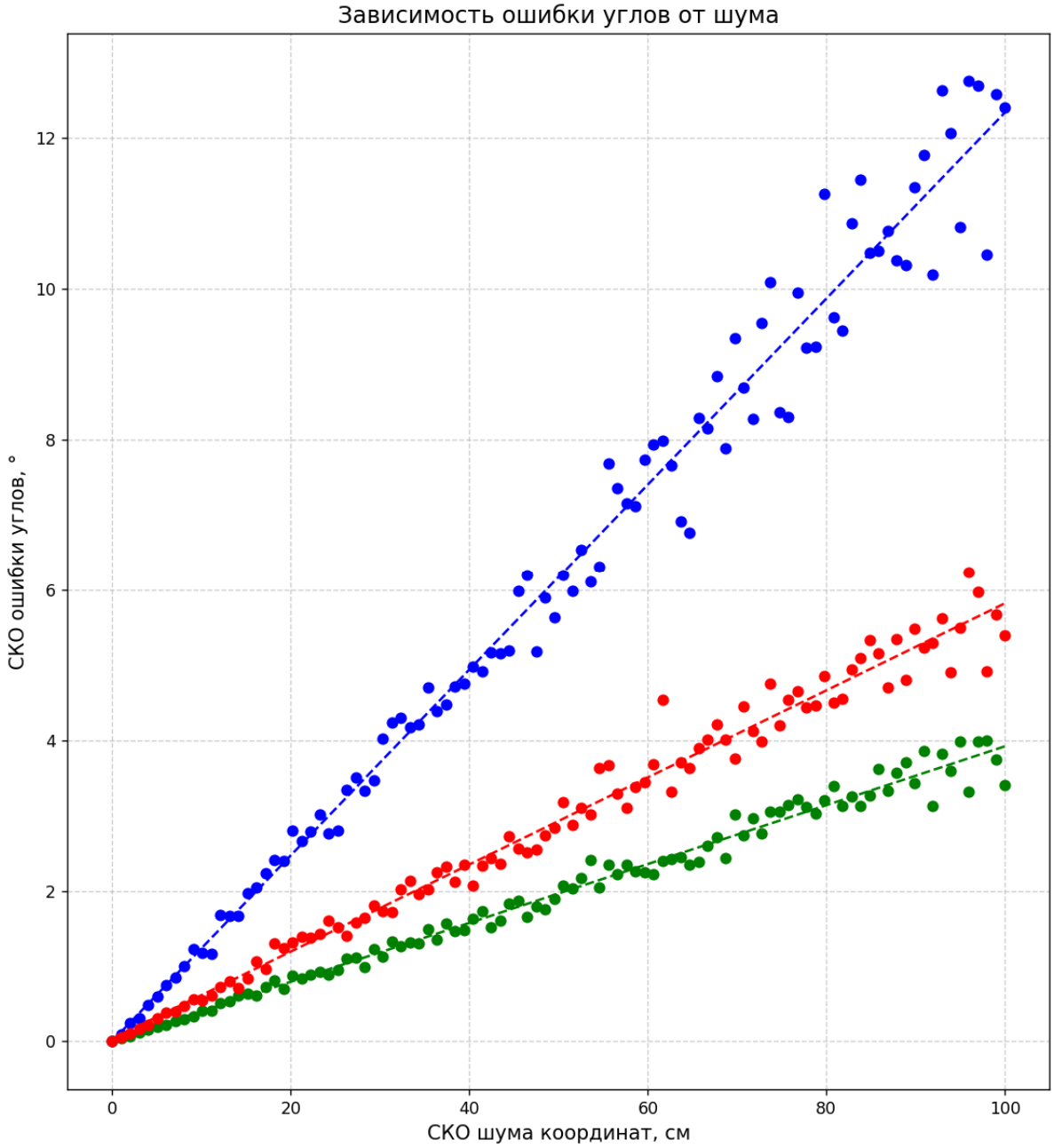


Рис. 4. Зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат, линейная аппроксимация этих зависимостей и коэффициент детерминации (линейности)
Fig. 4. The dependence of the SD of the determination of the Euler angles on the SD of the noise of the coordinates, the linear approximation of these dependencies and the coefficient of determination (linearity)

В таблице представлены параметры и коэффициенты выявленных линейных зависимостей.

Параметры и коэффициенты зависимостей
Parameters and coefficients of dependencies

Угол Эйлера	Аппроксимированная функция	Коэффициент k	Коэффициент b	Коэффициент R^2
Крена	$y = 0{,}123x + 0$	0,123	0	0,981
Курса	$y = 0{,}039x + 0{,}01$	0,039	0,01	0,985
Тангажа	$y = 0{,}058x + 0{,}04$	0,058	0,04	0,982

Общая ошибка определения углового положения ЛА в пространстве теоретически определяется формулой [17]

$$k_{\text{теор}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \tag{19}$$

где $r = 275$ см – радиус цилиндра, приближающего тело ЛА.

После применения «жадного» алгоритма оптимизации размещения приемников ГНСС на ЛА получим приближенную линейную функцию зависимости СКО определения углов Эйлера от СКО шума координат приемников и сравним ее с теоретической (рис. 5).

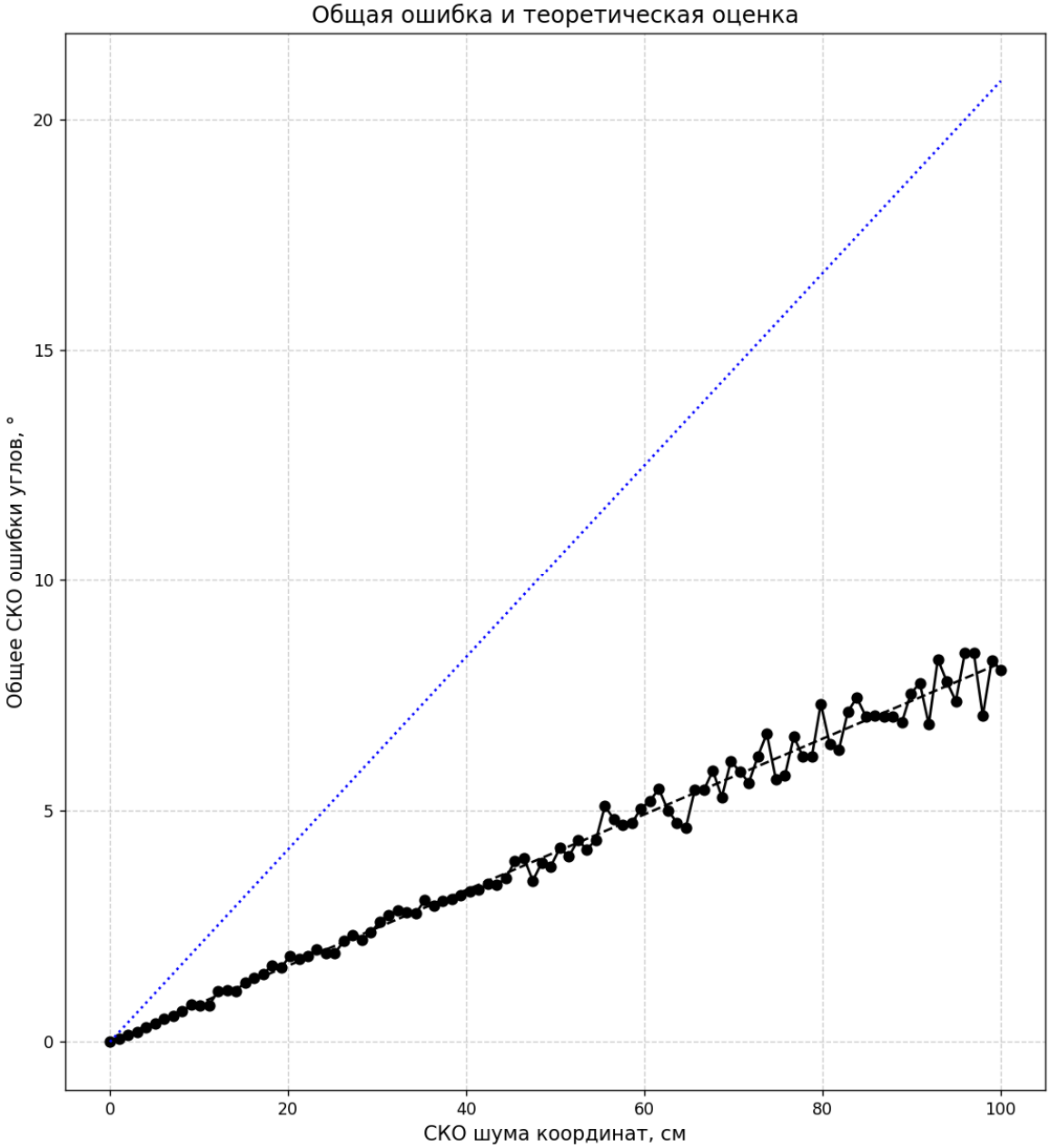


Рис. 5. Общая ошибка и теоретическая оценка
Fig. 5. General error and theoretical assessment

На рис. 5 пунктиром показана теоретическая линейная функция зависимости СКО шума в определении углов Эйлера от СКО шума определения местоположения приемника ГНСС, сплошной линией – результат моделирования при определении данной зависимости, а штриховой линией – аппроксимация данной зависимости, полученной в результате моделирования:

$$y = 0{,}082x + 0{,}01; \quad R^2 = 0{,}993. \tag{20}$$

Моделирование наглядно показывает, что после применения оптимизации размещения приемников ГНСС по «жадному» алгоритму удалось уменьшить влияние шума данных о координатах более чем в 2,5 раза по сравнению с теоретической оценкой, что явно свидетельствует о работоспособности и эффективности выбранных алгоритмов.

Заключение

Моделирование показало, что «жадный» алгоритм, основанный на выборе максимально удаленных друг от друга точек расположения антенн приемников ГНСС, демонстрирует высокую устойчивость и повторяемость результатов. В отличие от него, RANSAC-алгоритм оказался абсолютно неустойчивым для данной геометрии, выдавая каждый раз различные и непредсказуемые конфигурации точек.

Установлено, что зависимость ошибки определения углов Эйлера от ошибки измерения координат является линейной. Наилучшая конфигурация, найденная «жадным» алгоритмом, позволила более чем в 2,5 раза уменьшить коэффициент передачи шума по сравнению с теоретической оценкой для неоптимизированного размещения.

Проведенное исследование демонстрирует критическую важность оптимального взаимного расположения приемников для точного определения ориентации. Наиболее эффективным и надежным методом для размещения приемников ГНСС на цилиндрическом корпусе ракеты-носителя является «жадный» алгоритм. Его применение позволяет существенно повысить точность определения углового положения ЛА на критичных этапах полета, таких как взлет и посадка.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность А.Л. Шестакову за профессиональное руководство по государственному заданию, ценные рекомендации и внимание к деталям на всех этапах работы.

Особую благодарность авторы адресуют Е.Н. Прохоровой за стилистическое выверение и аккуратное оформление текста, повысившие качество представленного материала.

Список литературы

1. Аполлонов А.А. Улучшение точностных и надежностных характеристик аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в высоких широтах // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 158. С. 91–96.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2016617951. Расчет характеристик навигационного сеанса системы ГЛОНАСС / О.Н. Скрыпник, Р.О. Арефьев, Н.Г. Арефьева. Опубл. 19.07.2016.

3. Скрыпник О.Н., Арефьев Р.О., Астраханцева Н.Г. Методика построения и анализ полей точности ГЛОНАСС в заданной зоне воздушного пространства // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221 (11). С. 43–50.

4. Арефьев Р.О., Скрыпник О.Н., Межетов М.А. Исследование помехоустойчивости мультисистемного GNSS приемника // CredeExperto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 2 (37). С. 28–43. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_28

5. Акулова Е.А. Применение картометрического метода при выполнении кадастровых работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. Новосибирск: СГГА, 2014. С. 28–34.

6. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. URL: https://glonass-iac.ru/guide/ (дата обращения: 13.10.2025).

7. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.

8. Арене В.Д., Федоров С.М., Хитрик М.С. Динамика систем управления ракет с бортовыми цифровыми вычислительными машинами. М.: Машиностроение, 1976. 272 с.

9. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24, no. 6. P. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692

10. Ефимов А.И., Новиков А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 2. С. 258–265. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265

11. Лабораторные микротомографы: конструкция и алгоритмы обработки данных / А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, Д.А. Золотов и др. // Кристаллография. 2018. Т. 63, № 6. С. 1007–1011. DOI: 10.1134/S0023476118060073

12. Сосновский А.А., Хаймович И.А. Авиационная радионавигация: справ. М.: Транспорт, 1980. 264 с.

13. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем / под ред. Г.Н. Глазова. Томск: Томская государственная академия систем управления и радиоэлектроники, 1994. 144 с.

14. Стрижов В.В. Методы индуктивного порождения регрессионных моделей. М.: ВЦ РАН. 2008. 55 с.

15. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика: начальный курс. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Дело, 2007. 504 с. ISBN 978-5-7749-0473-0

16. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления: пер. с англ. М.: Мир, 1977. 650 с.

17. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов / Ю.Л. Козирацкий, Е.М. Афанасьева, А.И. Гревцев и др. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.

References

1. Apollonov A.A. Increase of safety of flights in polar regions with use of pseudolites. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*. 2010;(158):91–96. (In Russ.)

2. Skrypnik O.N., Arefyev R.O., Arefyeva N.G. *Raschet kharakteristik navigatsionnogo seansa sistemy GLONASS* [Calculation of GLONASS Navigation Session Characteristics]. Certificate of state registration of computer program RU 2016617951, 2016. (In Russ.)

3. Skrypnik O.N., Aref'ev R.O., Astrakhanceva N.G. Technique of construction and analysis of GLONASS fields of accuracy in the given zone of airspace. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*. 2015;221(11):43–50. (In Russ.)

4. Arefyev R.O., Skrypnik O.N., Mezhetov M.A. The research of the immunity of the multisystem GNSS receiver. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 2023;2(37):28–43. (In Russ.) DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_28

5. Akulova E.A. [Application of the Cartometric Method in Cadastral Works]. In: *Interexpo GEO-Siberia-2014. X International Scientific Congress, April 8–18, 2014, Novosibirsk. Vol. 2*. Novosibirsk, Siberian State Geodetic Academy, 2014. P. 28–34. (In Russ.)

6. GLONASS Application Consumer Center. Information and Analytical Center for Coordinate-Timing and Navigation Support. Available at: https://glonass-iac.ru/guide/ (accessed 13.10.2025).

7. Kuzovkov N.T., Salychev O.S. *Inertsial'naya navigatsiya i optimal'naya filtratsiya* [Inertial Navigation and Optimal Filtering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. 216 p. (In Russ.)

8. Arene V.D., Fedorov S.M., Khitrik M.S. *Dinamika sistem upravleniya raket s bortovymi tsifrovymi vychislitel'nymi mashinami* [Dynamics of Control Systems for Rockets with Onboard Digital Computers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 272 p. (In Russ.)

9. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*. 1981;24(6):381–395. DOI: 10.1145/358669.358692

10. Efimov AI, Novikov AI. An algorithm for multistage projective transformation adjustment for image superimposition. *Computer Optics*. 2016;40(2):258–265. (In Russ.) DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265

11. Buzmakov A.V., Asadchikov V.E., Zolotov D.A. et al. Laboratory microtomographs: design and data processing algorithms. *Crystallography Reports*. 2018;63(6):1057–1061. DOI: 10.1134/S106377451806007X

12. Sosnovskiy A.A., Khaymovich I.A. *Aviatsionnaya radionavigatsiya: spravochnik* [Aviation Radio Navigation. Handbook]. Moscow: Transport Publ., 1980. 264 p. (In Russ.)

13. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh sistem* [Theory of Phase Measuring Systems]. Ed. by G.N. Glazov. Tomsk: Tomsk State Academy of Control Systems and Radioelectronics Publ., 1994. 144 p. (In Russ.)

14. Strizhov V. V. *Metody induktivnogo porozhdeniya regressionnykh modeley* [Methods of Inductive Generation of Regression Models]. Moscow: Computing Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2008. 55 p. (In Russ.)

15. Magnus Ya.R., Katyshev P.K., Peresetskiy A.A. *Ekonometrika: nachal'nyy kurs* [Econometrics. An Introductory Course]. 8th ed., rev. and suppl. Moscow: Delo Publ., 2007. 504 p. (In Russ.) ISBN 978-5-7749-0473-0.

16. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear Optimal Control Systems*. Transl. from Engl. Moscow: Mir Publ., 1977. 650 p. (In Russ.)

17. Koziratskiy Yu.L., Afanas'eva E.M., Grevtsev A.I., et al. *Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-elektronnykh sredstv, otsenka parametrov ikh signalov* [Detection and Coordinate Measurement of Optoelectronic Means, Estimation of Their Signal Parameters]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2015. 456 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Лысов Станислав Сергеевич, преподаватель кафедры радиоэлектроники и систем связи, аспирант кафедры информационно-измерительной техники Высшей школы электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lysovss@susu.ru.

Дударев Николай Валерьевич, канд. техн. наук, доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи Высшей школы электроники и компьютерных наук, dudarevnv@susu.ru.

Information about the authors

Stanislav S. Lysov, Lecturer of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, Postgraduate Student of the Department of Information and Measurement Technology of the Higher School of Electronics and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lysovss@susu.ru.

Nikolay V. Dudarev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Radio Electronics and Communication Systems of the Higher School of Electronics and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dudarevnv@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025
The article was submitted 10.11.2025

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы
Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья
УДК 004.942
DOI: 10.14529/ctcr260106

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТА НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Д.Ю. Казанцев[1, 2], *dep5@vniitf.ru*
А.С. Пилипенко[1], *A.S.Pilipenko@vniitf.ru, https://orcid.org/0009-0006-3163-9183*
Ю.В. Осеев[1], *dep5@vniitf.ru*
[1] *Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия*
[2] *Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Челябинская область, Россия*

Аннотация. При контроле параметров операционных усилителей (ОУ), подвергаемых воздействию ионизирующего излучения, может потребоваться использование нескольких схем включения и достаточно длительная (до десятков часов) регистрация критериальных параметров, что требует автоматизации всего процесса. **Цели и задачи:** решение задачи автоматизированного контроля параметров ОУ в течение длительного времени при необходимости использования разных схем включения ОУ. **Методы.** До и во время воздействия с помощью разработанной методики контролировались такие наиболее чувствительные к воздействию ионизирующего излучения параметры ОУ, как напряжение смещения нуля, входной ток, быстродействие. Управление переключением измерительных схем, подключение и контроль напряжения питания, регистрация контролируемых параметров проводились с помощью приборов, объединенных под управлением ПК. Для управления приборами и регистрации данных была разработана интерфейсная программа, обеспечивающая отображение результатов измерения всех контролируемых параметров в реальном времени с одновременной записью в файл. **Результаты.** Для ОУ, облучаемого гамма-квантами изотопного источника на основе ^{60}Co, получены графики зависимостей исследуемых параметров от накопленной дозы при общем времени регистрации порядка 70 часов для различных значений интенсивности воздействия. Показано, что из исследуемых параметров только входной ток заметно изменяется в рассматриваемом диапазоне уровней воздействия. Экспериментальные результаты проанализированы в рамках наиболее популярной на сегодняшний день конверсионной модели встраивания заряда на поверхностные состояния, определены коэффициенты аппроксимации полученных результатов модельными кривыми для двух различных интенсивностей набора дозы. **Заключение.** Предложена схема контроля параметров ОУ в процессе радиационного эксперимента, разработано программное обеспечение управления измерительным оборудованием, используемого для автоматизированной регистрации отклика ОУ в течение длительного времени. Проведена апробация методики в условиях реального эксперимента при вариации интенсивности воздействия. Установлено, что в ОУ проявляется эффект низкой интенсивности, который не удается описать в рамках конверсионной модели.

Ключевые слова: операционный усилитель, автоматизированный контроль параметров, эффект низкой интенсивности, ионизирующее излучение

Для цитирования: Казанцев Д.Ю., Пилипенко А.С., Осеев Ю.В. Автоматизированный контроль параметров операционных усилителей при исследовании эффекта низкой интенсивности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 72–79. DOI: 10.14529/ctcr260106

© Казанцев Д.Ю., Пилипенко А.С., Осеев Ю.В., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260106

OPERATIONAL AMPLIFIER PARAMETERS AUTOMATED CONTROL IN THE ENHANCED LOW DOSE RATE SENSITIVITY EFFECT INVESTIGATION

D.Yu. Kazantsev [1, 2], *dep5@vniitf.ru*
A.S. Pilipenko [1], *A.S.Pilipenko@vniitf.ru, https://orcid.org/0009-0006-3163-9183*
Yu.V. Oseev [1], *dep5@vniitf.ru*

[1] *Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia*
[2] *Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia*

Abstract. During monitoring of the operational amplifiers (op amps) parameters exposed to ionizing radiation, it may be necessary to use several application circuits and register the criteria parameters for a sufficiently long time (up to tens of hours) that requires the whole process automation. **Aims and objectives.** The solution of the task of op-amp parameters automated control for a long time using the different op-amp application circuits **Methods.** The developed technique was used to control the most sensitive to the ionizing radiation exposure op-amp characteristics i.e. zero-offset voltage, input current and the performance during the exposure. The set of instruments controlled by PC was used to measuring schemes switching, power supply on-set and control, observed parameters registration. The interface software visualized all controlled parameters results in real time with simultaneously logging was developed to control instruments and data registration. **Results.** The relations of the studied op-amp parameters on the accumulated dose for different exposure intensities have been obtained for op-amp exposed to ^{60}Co gamma isotope source (total registration time was about 70 hours) It was shown that among investigating parameters only input current varies significantly in the considering exposure level interval. Experimental results are analyzed in the network of the today' most popular conversion model of charge injection to surface states; coefficients of obtained results with model curves approximation were determined for the two different dose rates. **Conclusion.** A circuit for monitoring op-amp parameters during a radiation experiment is proposed, and software for controlling measuring equipment used for automated recording of op-amp response over a long period of time is developed. The methodology was tested in a real experiment with dose rate variation. It has been established that the low intensity effect is manifested in the op-amp, which cannot be described within the framework of the conversion model.

Keywords: operational amplifier, automated parameter control, enhanced low dose rate sensitivity effect, ionizing radiation

For citation: Kazantsev D.Yu., Pilipenko A.S., Oseev Yu.V. Operational amplifier parameters automated control in the enhanced low dose rate sensitivity effect investigation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):72–79. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260106

Введение

ОУ являются частью большинства современных аналоговых электронных устройств. Существует множество видов ОУ, обладающих различными характеристиками и внутренним устройством. Они могут быть построены как по биполярной, так и по МОП-технологии [1–3]. Вместе с тем для ОУ всех видов можно выделить ряд параметров, наиболее чувствительных к воздействию ионизирующего излучения: напряжение смещения нуля $U_{см}$, входной ток $I_{вх}$, быстродействие или скорость нарастания выходного напряжения $V_ф$ [4].

Как правило, в практике радиационного эксперимента объект исследования (ОИ) включается по схеме, позволяющей реализовать самый критичный режим работы или контролировать наибольшее число параметров непосредственно во время воздействия. Однако при контроле разных параметров могут отличаться схемы включения, что требует дополнительных мер при разработке методики контроля. К примеру, типовое значение входного тока ОУ составляет единицы нА, т. е. его измерение является трудоёмкой задачей [5], и в этом случае предпочтительно применять косвенные методы измерения [6, 7].

Испытания на радиационную стойкость могут быть достаточно продолжительными. Например, при имитации воздействия факторов космического пространства [8] рекомендуемая скорость набора дозы составляет не более 0,1 рад(Si)/с [9–11]. Как показано в ряде работ [4, 8–12], более высокие интенсивности воздействия могут приводить к некорректной оценке стойкости ОИ, изготовленных по биполярной технологии. Учитывая, что типовые требования по стойкости составляют ~ 10^3–10^5 рад(Si) [13], возникает необходимость контроля параметров ОИ в течение десятков и даже сотен часов.

Таким образом, целью настоящей работы является решение задачи автоматизированного контроля параметров ОУ в течение длительного времени при необходимости использования разных схем включения ОУ.

1. Методика эксперимента

Для обеспечения контроля необходимых параметров была предложена схема включения ОУ (рис. 1), в которой положением ключей определяется текущий измеряемый параметр. В качестве ключей использованы реле. Если оба ключа разомкнуты, то к входу ОУ подключен высокоомный резистор $R_{3,2}$ и выходное напряжение ОУ $U_{вых}$ пропорционально $I_{вх}$. При замыкании ключа К параллельно резистору $R_{3,2}$ подключается низкоомный резистор $R_{3,1}$ и $U_{вых}$ пропорционально $U_{см}$. Для измерения $V_ф$ замыкаются оба ключа и на вход ОУ подается сигнал с генератора. Во всех случаях $U_{вых}$ контролируется с помощью осциллографа, при этом для повышения точности измерений $U_{см}$ и $I_{вх}$ из осциллограммы определяется среднее значение величин.

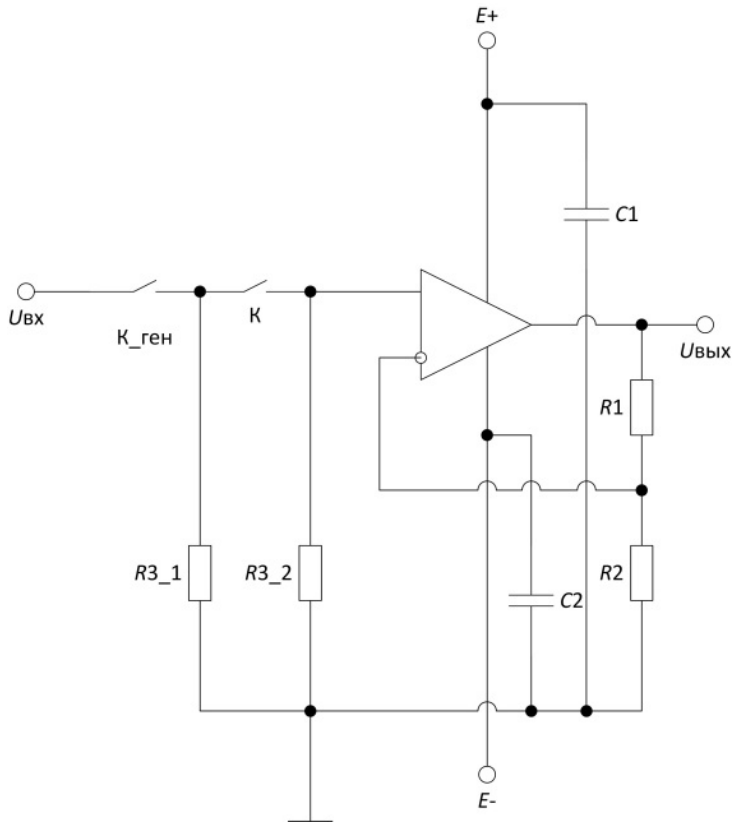


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема включения ОУ:
R_1 = 180 Ом, R_2 = 1800 Ом, R_{3_1} = 51 Ом, R_{3_2} = 2 МОм, C_1 = C_2 = 0,1 мкФ
Fig. 1. Op-amp application circuit:
R_1 = 180 Ω, R_2 = 1800 Ω, R_{3_1} = 51 Ω, R_{3_2} = 2 MΩ, C_1 = C_2 = 0.1 μF

Для контроля обозначенных параметров помимо генератора и осциллографа необходимы источники питания ОУ и реле. Общая схема измерительного комплекса приведена на рис. 2. При выборе конкретных приборов помимо их характеристик учитывалась возможность программного управления ими посредством ПЭВМ.

Для управления приборами и регистрации данных была разработана программа, упрощенная блок-схема алгоритма которой приведена на рис. 3. Вначале настраиваются параметры используемых приборов, задаются входные параметры в соответствии с типономиналом исследуемого ОУ и время между циклами измерения параметров. После запускается основной цикл измерений, который может выполняться заданное число раз или до принудительной остановки программы. Все измеренные данные сохраняются в текстовый файл.

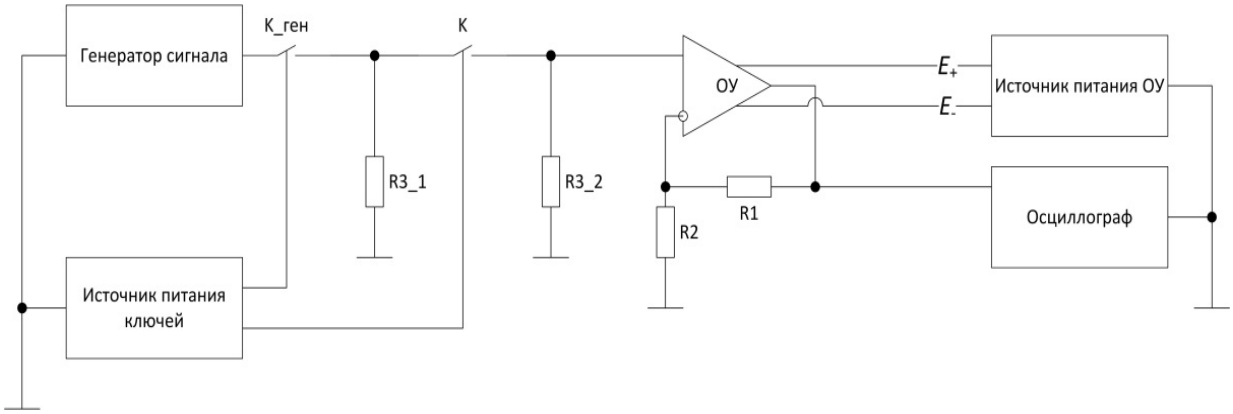


Рис. 2. Измерительный комплекс
Fig. 2. Measuring equipment

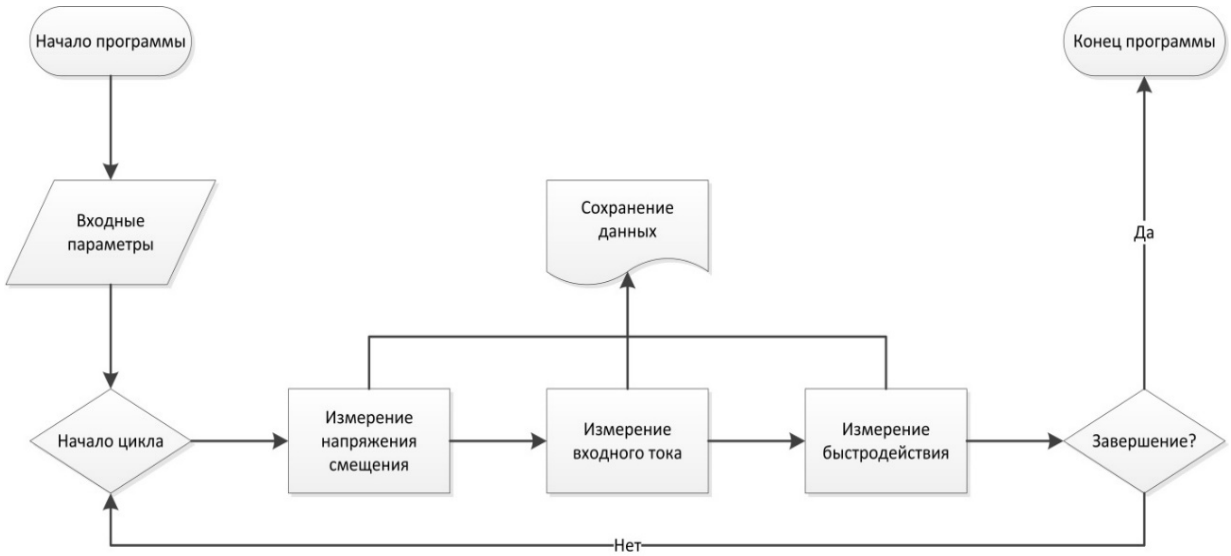


Рис. 3. Блок-схема алгоритма программы управления приборами
Fig. 3. Block diagram of the instrument control program algorithm

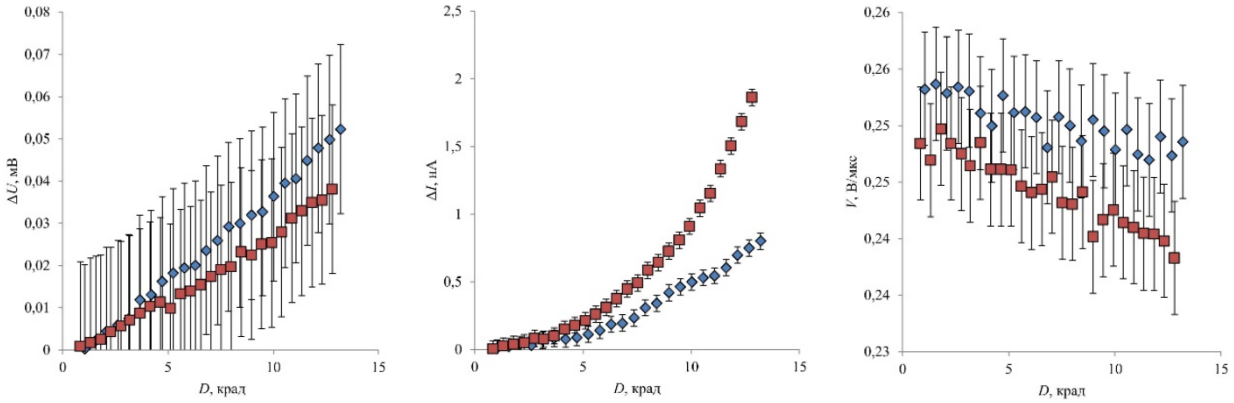
2. Методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран ОУ, построенный по биполярной технологии, со следующими параметрами: $U_{см}$ – не более 75 мкВ, $I_{вх}$ – не более 4 нА, $V_ф$ – не менее 0,1 В/мкс.

В качестве источника воздействия использовался источник на основе ^{60}Co. Воздействию были подвержены два образца одного типономинала при различных интенсивностях поглощённой дозы: 11,6 рад(Si)/с и 0,1 рад(Si)/с. Критерием окончания воздействия являлся выход одного из контролируемых параметров за допустимые пределы.

3. Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 4 представлены результаты экспериментов. Из-за значительных погрешностей измерений параметров $\Delta U_{см}$ и $V_ф$ (рис. 4а, с) выявить статистически достоверную разницу в деградации двух образцов ОУ не представляется возможным.



a) b) c)

Рис. 4. Зависимости изменения $U_{см}$ (a), изменения $I_{вх}$ (b) и $V_ф$ (c) от поглощенной дозы гамма-излучения при различных интенсивностях набора дозы (маркер квадрат – 0,1 рад(Si)/с, маркер ромб – 11,6 рад(Si)/с)
Fig. 4. Relations of variations in U_{of} (a); variations in I_{in} (b) and V_f (c) on the absorbed dose of gamma radiation at different dose rates (square marker – 0.1 rad(Si)/s, rhomb marker – 11.6 rad(Si)/s)

Эффект низкой интенсивности наблюдается при изменении входных токов ОУ. Рост входного тока происходит за счёт увеличения тока базы входного биполярного транзистора дифференциального каскада [14]. Такая реакция на воздействие ионизирующего излучения чаще всего объясняется в рамках конверсионной модели [15], согласно которой приращение базового тока биполярного транзистора прямо пропорционально приращению плотности поверхностных состояний и может быть определено как

$$\Delta I = \left(K_{\Gamma} + K_{\text{М}}\right) D + K_{\Gamma} P \tau \left(e^{-\frac{D}{P\tau}} - 1 \right), \tag{1}$$

где K_{Γ} и $K_{\text{М}}$ – приращение тока базы на единицу поглощённой дозы при низкой и высокой интенсивности соответственно; τ – характерное время конвертации положительного захваченного заряда в оксиде в поверхностные состояния полупроводника; P – интенсивность излучения.

Для экспериментальных данных изменения входного тока ОУ была проведена аппроксимация по формуле (1). Результаты представлены на рис. 5, в таблице приведены коэффициенты аппроксимации.

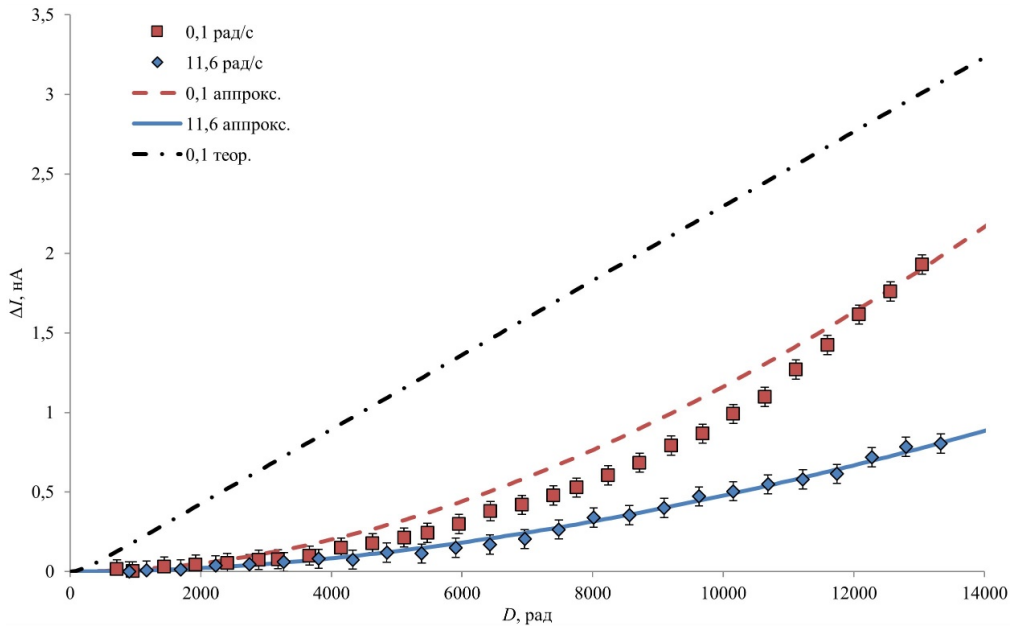


Рис. 5. Зависимости изменения входного тока от дозы гамма-излучения при различных интенсивностях
Fig. 5. Relations of the input current variation on the gamma radiation dose at different dose rates

Коэффициенты аппроксимации
Approximation coefficients

Параметр	Образец № 1	Образец № 2
P, рад(Si)/с	11,6	0,1
τ, с	$1{,}8\cdot10^{3} \pm 0{,}6\cdot10^{3}$	$2{,}4\cdot10^{5} \pm 0{,}5\cdot10^{5}$
$K_{Г}$, нА/рад(Si)	$2\cdot10^{-4} \pm 10^{-5}$	$6\cdot10^{-4} \pm 10^{-5}$
$K_{М}$, нА/рад(Si)	$2\cdot10^{-15} \pm 10^{-15}$	$2\cdot10^{-15} \pm 10^{-15}$

Видно, что теоретическая зависимость, построенная на основе коэффициентов аппроксимации для высокой интенсивности с использованием формулы (1), не соответствует экспериментальным данным, полученным при низкой интенсивности. Это может являться следствием приближенного характера конверсионной модели либо обуславливаться влиянием деградации остальных каскадов ОУ (а не только входного).

Заключение

Предложена схема контроля параметров ОУ в процессе радиационного эксперимента, разработано программное обеспечение управления измерительным оборудованием, используемое для автоматизированной регистрации отклика ОУ в течение длительного времени. Проведена апробация методики в условиях реального эксперимента. Установлено, что в ОУ проявляется эффект низкой интенсивности, который не удается описать в рамках конверсионной модели.

Список литературы

1. Чижма С.Н. Основы схемотехники: учеб. пособие для вузов. Омск: Апельсин, 2008. 424 с.

2. Осадченко В.Х., Волкова Я.Ю. Операционные усилители: учеб. пособие для вузов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 156 с.

3. The Performance of Operational Amplifiers Consisting of 4H-SiC CMOS After Gamma Irradiation / M. Masunaga, S. Sato, A. Shima, R. Kuwana // IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. No. 4. P. 1–6. DOI: 10.1109/TED.2018.2877846

4. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: науч. изд. / под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 512 с.

5. Автоматизированная контрольно-измерительная система для радиационных испытаний операционных усилителей / М.А. Соковишин, Д.В. Бойченко, А.Я. Борисов и др. // Тезисы докладов 16-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2013». Лыткарино: АО «НИИП», 2013. С. 73–74.

6. Neutron Effects on Short Circuit Currents of Op Amps And Consequences / F.J. Franco, Y. Zong, J. Casas-Cubillos et al. // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 2005. Vol. 52, no. 5. P. 1530–1537. DOI: 10.1109/TNS.2005.855817

7. Franco F.J., Zong Y., Agapito J.A. Degradation of Power Bipolar Operational Amplifiers in a Mixed Neutron and Gamma Environment // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2007. Vol. 54, no. 4. P. 982–988. DOI: 10.1109/TNS.2007.892183

8. Методология обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию ионизирующего излучения космического пространства: моногр. / Н.В. Кузнецов, Н.И. Николаева, Р.А. Ныммик и др. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. 380 с.

9. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под науч. ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2013. 255 с.

10. ОСТ 134-1034-2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.

11. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.

12. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 319 с.

13. Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах / Согоян А.В. и др. // Модель космоса: науч.-информ. изд.: в 2 ч. Ч. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007. С. 466–493.

14. Таперо К.И., Диденко С.И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учеб. пособие. М.: Издат. дом МИСиС, 2013. 349 с.

15. Конверсионная модель эффекта низкой интенсивности в биполярных микроэлектронных структурах при воздействии ионизирующего излучения / В.С. Першенков, Д.В. Савченко, А.С. Бакеренков, В.Н. Улимов // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 2. С. 102–112.

References

1. Chizhma S.N. *Osnovy skhemotekhniki: ucheb. posobie dlya vuzov* [Fundamentals of Circuit Design. Textbook for Universities]. Omsk: Apel'sin Publ., 2008. 424 p. (In Russ.)

2. Osadchenko V.Kh., Volkova Ya.Yu. *Operatsionnye usiliteli: ucheb. posobie dlya vuzov* [Operational Amplifiers. Textbook for Universities]. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2020. 156 p. (In Russ.)

3. Masunaga M., Sato S., Shima A., Kuwana R. The Performance of Operational Amplifiers Consisting of 4H-SiC CMOS After Gamma Irradiation. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2018;(4):1–6. DOI: 10.1109/TED.2018.2877846

4. Chumakov A.I. (Ed.). *Radiatsionnaya stoykost' izdeliy EKB: nauchnoe izdanie* [Radiation resistance of electronic components. Scientific publication]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2015. 512 p. (In Russ.)

5. Sokovishin M.A., Boychenko D.V., Borisov A.Ya., Kessarinskiy L.N. [Automated test and measurement system for radiation testing of operational amplifiers]. In: *Abstracts of the 16th All-Russian Scientific and Technical Conference "Radiation Resistance of Electronic Systems "Resilience-2013"*. Lytkarino: JSC "Research Institute of Instruments", 2013. P. 73–74. (In Russ.)

6. Franco F.J., Zong Y., Casas-Cubillos J., Rodriguez-Ruiz M.A., Agapito J.A. Neutron Effects on Short Circuit Currents of Op Amps And Consequences. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2005;52(5):1530–1537. DOI: 10.1109/TNS.2005.855817

7. Franco F.J., Zong Y., Agapito J.A. Degradation of Power Bipolar Operational Amplifiers in a Mixed Neutron and Gamma Environment. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2007;54(4):982–988. DOI: 10.1109/TNS.2007.892183

8. Kuznetsov N.V., Nikolaeva N.I., Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Yushkov B.Yu. *Metodologiya obespecheniya stoykosti bortovoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu ioniziruyushchego izlucheniya kosmicheskogo prostranstva: monogr.* [Methodology for Ensuring the Resistance of Spacecraft Onboard Equipment to the Effects of Ionizing Radiation in Outer Space. Monograph]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2017. 380 p. (In Russ.)

9. Raykunov G.G. (Ed.). *Ioniziruyushchie izlucheniya kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeystvie na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Ionizing radiation of outer space and its impact on on-board equipment of spacecraft]. Moscow: Fizmatlit, 2013. 255 p. (In Russ.)

10. *OST 134-1034-2012. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie kosmicheskikh apparatov. Metody ispytaniy i otsenki stoykosti bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu elektronnogo i protonnogo izlucheniy kosmicheskogo prostranstva po dozovym effektam* [Industry standard 134-1034-2012. Spacecraft Equipment, Devices, and Facilities. Testing and Evaluation Methods for the Resistance of Onboard Electronic Equipment of Spacecraft to the Effects of Electron and Proton Radiation in Space Based on Dose Effects]. (In Russ.)

11. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. *Radiatsionnye effekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012. 304 p. (In Russ.)

12. Chumakov A.I. *Deystvie kosmicheskoy radiatsii na integral'nye skhemy* [The effect of cosmic radiation on integrated circuits]. Moscow: Radio i svyaz', 2004. 319 p. (In Russ.)

13. Sogoyan A.V. et al. *Poverkhnostnye radiatsionnye effekty v integral'nykh skhemakh* [Surface radiation effects in integrated circuits]. In: Panasyuk M.I., Novikov L.S. (Eds.). *Model' kosmosa: nauch.-inform. izd.: v 2 ch. Ch. 2. Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie kosmi-*

cheskikh apparatov [Space Model: A Scientific Information Publication: in 2 parts. Part 2. Impact of the Space Environment on Spacecraft Materials and Equipment]. Moscow: KDU Publ., 2007. P. 466–493. (In Russ.)

14. Tapero K.I., Didenko S.I. *Osnovy radiatsionnoy stoykosti izdeliy elektronnoy tekhniki: radiatsionnye effekty v izdeliyakh elektronnoy tekhniki: ucheb. posobie* [Fundamentals of radiation resistance of electronic products: radiation effects in electronic products. Tutorial]. Moscow: Publishing House MISiS, 2013. 349 c. (In Russ.)

15. Pershenkov V.S., Savchenkov D.V., Bakerenkov A.S., Ulimov V.N. Conversion model of enhanced low-dose-rate sensitivity for bipolar ICS. *Russian Microelectronics*. 2010;39(2):91–99. DOI: 10.1134/S1063739710020046

Информация об авторах

Казанцев Денис Юрьевич, инженер-исследователь, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; аспирант, Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Челябинская область, Россия; dep5@vniitf.ru.

Пилипенко Анатолий Сергеевич, канд. физ-мат. наук, старший научный сотрудник, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; A.S.Pilipenko@vniitf.ru.

Осеев Юрий Владимирович, ведущий инженер, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; dep5@vniitf.ru.

Information about the authors

Denis Yu. Kazantsev, Researching engineer, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; Postgraduate student, Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; dep5@vniitf.ru.

Anatolii S. Pilipenko, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior researcher, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; A.S.Pilipenko@vniitf.ru.

Yuri V. Oseev, Leading engineer, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; dep5@vniitf.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025
The article was submitted 18.06.2025

Управление в социально-экономических системах
Control in social and economic systems

Научная статья
УДК 658.1 + 004.94
DOI: 10.14529/ctcr260107

ПОДХОД ПО ЦЕНООБРАЗОВАНИЮ НА ОЛИГОПОЛИСТИЧЕСКОМ РЫНКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА ЛЕРНЕРА

***О.И. Дранко**, olegdranko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4664-1335*
***А.С. Белова**, belova@ipu.ru, https://orcid.org/0009-0000-1241-3011*
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. В данной работе представлен метод анализа и моделирования процессов олигопольного рынка на основе данных о предельных затратах и доле рынка, а также оценка эластичности спроса на олигополистическом рынке. В работе также рассмотрены различные типы существующих на данный момент рыночных структур: от совершенной конкуренции до монополии и олигополии. На основе проведенного обзора литературы были проанализированы теоретические основы олигополии, из чего последовала необходимость рассмотрения рынка однородной продукции с целью анализа задачи максимизации прибыли для конкретных организаций. **Целью работы** является разработка и обоснование подхода по ценообразованию по критерию прибыли на олигополистическом рынке. **Материалы и методы.** Решена задача оптимизации деятельности предприятия по критерию прибыли с использованием понятий эластичности и индекса Лернера в предположении линейной кривой спроса. Объектом исследования являются процессы формирования цен на олигополистическом рынке. Предметом исследования являются количественные зависимости между ценой, предельными издержками и эластичностью спроса, определяющие уровень рыночной власти фирм. В качестве исходных данных использовалась финансовая отчетность организаций. В качестве исходных данных использовалась финансовая отчетность организаций. В качестве источника финансовой отчетности организаций использовался сервис бухгалтерской отчетности (финансовой отчетности) Федеральной налоговой службы России. Из обработки финансовой отчетности 2,9 млн организаций методами обработки больших данных была собрана выборка до 60 тыс. организаций с выручкой более 1 млрд руб., из которых выделена 21 организация в анализируемом сегменте. **Результаты.** Предложен метод определения эластичности как инструмент оценки реакции доходности на изменение цен. Создана методика расчета индекса Лернера на отраслевых данных. В результате исследования подтверждена гипотеза о том, что индекс Лернера в связке с эластичностью по прибыли можно применять к подходу по максимизации прибыли на предприятиях. **Заключение.** На базе финансовой отчетности организаций разработан метод по оценке эластичности олигополистического рынка. Собраны данные по отрасли с ОКВЭД-2 27.12 «Производство электрической распределительной и регулирующей аппаратуры», а также приведены расчеты оценочного значения эластичности спроса. Выявлен ряд направлений, которые требуют дальнейшего развития.

Ключевые слова: олигополия, управление, индекс Лернера, ценообразование, эластичность спроса, прибыль, индекс Херфиндаля – Хиршмана

Для цитирования: Дранко О.И., Белова А.С. Подход по ценообразованию на олигополистическом рынке с использованием индекса Лернера // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 80–89. DOI: 10.14529/ctcr260107

© Дранко О.И., Белова А.С., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260107

AN APPROACH TO PRICING IN AN OLIGOPOLISTIC MARKET USING THE LERNER INDEX

***O.I. Dranko**, olegdranko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4664-1335*
***A.S. Belova**, belova@ipu.ru, https://orcid.org/0009-0000-1241-3011*
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This paper presents a method for analyzing and modeling oligopolistic market processes based on marginal cost and market share data, as well as an assessment of the elasticity of demand in an oligopolistic market. The paper also examines various types of currently existing market structures: from perfect competition to monopoly and oligopoly. Based on a literature review, the theoretical foundations of oligopoly were analyzed, which led to the need to consider the market for homogeneous products in order to analyze the profit maximization problem for specific organizations. **The purpose** of the work is to develop and substantiate an approach to pricing based on the profit criterion in an oligopolistic market. **Materials and Methods.** The problem of optimizing enterprise performance based on the profit criterion was solved using the concepts of elasticity and the Lerner index under the assumption of a linear demand curve. The object of the study is price formation processes in an oligopolistic market. The subject of the study is the quantitative relationships between price, marginal costs and elasticity of demand, which determine the level of market power of firms. The financial statements of the organizations were used as the source data. The financial statements of the organizations were used as the source data. The accounting reporting service (financial statements) of the Federal Tax Service of Russia was used as the source of the financial statements of the organizations. A sample of up to 60 thousand organizations with revenues exceeding 1 billion rubles was collected from 2.9 million organizations using big data processing methods. 21 organizations in the analyzed segment were selected from these organizations. **Results.** A method for determining elasticity as a tool for assessing the reaction of profitability to price changes is proposed. A methodology for calculating the Lerner index based on industry data is developed. The study confirmed the hypothesis that the Lerner index, in conjunction with profit elasticity, can be applied to the approach to profit maximization at enterprises. **Conclusion.** A method for assessing the elasticity of an oligopolistic market was developed based on the financial statements of organizations. Data on the industry with OKVED2 27.12 “Manufacture of electrical distribution and control equipment” was collected, and calculations of the estimated value of demand elasticity are provided. A number of areas have been identified that require further development.

Keywords: oligopoly, management, Lerner index, pricing, elasticity of demand, profit, Herfindahl–Hirschman index

For citation: Dranko O.I., Belova A.S. An approach to pricing in an oligopolistic market using the Lerner index. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):80–89. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260107

Введение

В текущем состоянии российской экономики рынок представлен олигополистической структурой с преобладающими чертами олигополий, основанных на дифференциации товаров или услуг, в котором невозможно разработать универсальный подход к ценообразованию на всех предприятиях. Но, отталкиваясь от условий существования конкретной организации или отрасли рынка, можно задать направление для механизма ценообразования, так как структура рынка выступает неподвластным для организации фактором, на которое не представляется возможным оказывать влияние. Это выступает ограничителем действий участников рынка и принимаемых ими решений.

1. Обзор

В текущем состоянии российской экономики рынок представлен олигополистической структурой с преобладающими чертами олигополий, основанных на дифференциации товаров или услуг [1].

Также прослеживается разделение этих олигополий на две основные группы, которые стоит рассмотреть подробнее. Первая группа представляет собой наличие крупных организаций, которые существенно не выделяются на фоне общей структуры, являются взаимозаменяемыми в большинстве случаев, легко уступающими более эффективным. Встречаются чаще всего в сферах агропромышленного комплекса, ретейла, строительства. Ко второй группе относится ситуация, когда преобладает одна крупная организация с большим государственным влиянием. В таком случае рынок выглядит как один крупный игрок и множество мелких, но несущественных игроков. По формальным признакам имеется масса предприятий, но фактически преобладает лишь одно.

Классический подход гласит [2], что тип рынка, достигающий максимальной эффективности, – совершенная конкуренция, к сожалению, возможная только в теории. Поэтому олигополия, возможная не только на бумаге, но и в практическом ключе, наиболее эффективна на данный момент.

Разработка универсального подхода к ценообразованию на всех предприятиях сопряжена с рядом трудностей. Но, отталкиваясь от условий существования конкретной организации или отрасли рынка, можно задать направление для механизма ценообразования, так как структура рынка выступает неподвластным для организации фактором, на которое не представляется возможным оказывать влияние. Это выступает ограничителем действий участников рынка и принимаемых ими решений [3].

Рассматривая распространенные типы существующих рыночных структур, разделим их на две большие группы: совершенную конкуренцию и несовершенную конкуренцию, представленные на рис. 1.

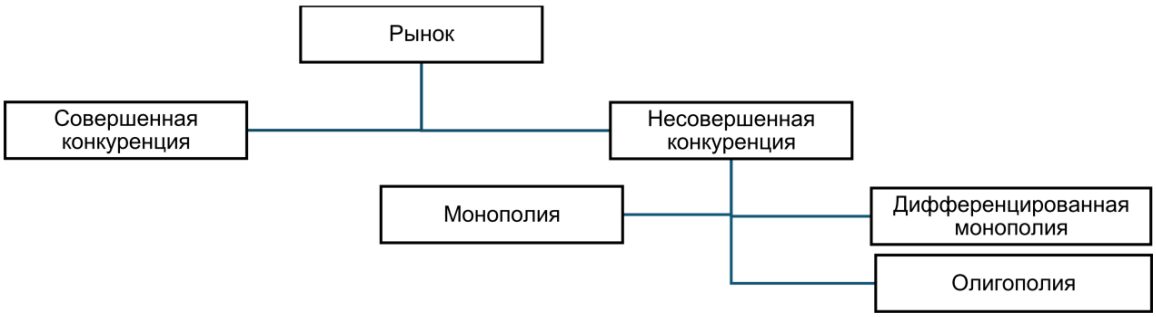


Рис. 1. Упрощенная схема рыночных структур
Fig. 1. Simplified diagram of market structures

В отличие от рынка совершенной конкуренции, субъекты олигополии при формировании стратегии вынуждены учитывать потенциальные действия конкурентов. Дифференцированная монополия в механизмах своего ценообразования содержит элементы как от совершенной конкуренции, так и от классической монополии. В результате сочетания этих элементов достигается долгосрочное рыночное равновесие в ценах. В остальных же случаях, таких как монополия, решения о ценовой политике принимаются только на основании возможностей самих монополистов, ориентирующихся не только на достижение максимальной прибыли, но других целей.

Также требуется введение количественной оценки степени рыночной власти, чтобы однозначно определить, к какому конкретно типу рынка относится та или иная отрасль экономики.

Индекс Лернера [4] характеризует разницу между монопольной ценой и предельными издержками на производстве к монопольной цене:

$$L = \frac{P - MC}{P}, \quad (1)$$

где L – значение индекса Лернера; P – цена продукции; MC – предельные издержки выпуска продукции.

При эластичном спросе и большом объеме производства относительная надбавка к предельным издержкам мала. При совершенной конкуренции $MC = P$, из чего следует, что $P - MC = 0$ и $L = 0$. Чем выше значение индекса Лернера, тем больше монопольная власть, которая максимальна при эластичности, равной 0.

Изменение рыночных условий, таких как введение инновационных продуктов, требует модификации модели. Это открывает возможности для количественной аналитики конкурентной среды и формирования политики ценообразования.

Первые теоретические конструкции олигополии принадлежат А. Курно [5]. Эти модели заложили фундамент анализа стратегического поведения фирм. В работе 1838 г. А. Курно впервые применил аналитический подход к взаимодействию между организациями, которые конкурируют между собой в объемах выпуска продукции на однородном рынке [6]. В своей модели А. Курно предположил, что рыночное равновесие достигается в условиях, когда каждая фирма, стремясь к максимизации прибыли, определяет свой объем производства, исходя из предположения о неизменности объемов выпуска конкурентов.

Многие теории не всегда однозначно дают четкие алгоритмы для поиска неподвижных (статичных) точек, а также не учитывают некоторые ограничения в рамках экономики, таких как неотрицательный объем выпуска продукции предприятием.

Условия равновесия в модели А. Курно задаются, формируя обязательные требования к свойствам функции спроса и издержек. При рассмотрении рынка с однородной продукцией формула, задающая линейную функцию спроса, выглядит следующим образом:

$$P(Q) = a - bQ, \tag{2}$$

где P – отраслевой спрос; a и b – коэффициенты модели; Q – общий выпуск продукции.

2. Содержательная постановка задачи

Чтобы выделить базовую структуру модели, рассмотрим рынок с n фирмами, производящими однородный товар.

Совокупный объем выпуска:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} q_i, \tag{3}$$

где q_i – объем выпуска конкретной фирмы.

Рыночная цена определяется обратной функцией спроса $P = P(Q)$.

Функция прибыли фирмы:

$$\Pi_i = P(Q)q_i - MC_i(q_i), \tag{4}$$

где $C_i(q_i)$ – функция издержек i-й фирмы.

Рассмотрим задачу максимизации прибыли. В данном случае максимизация прибыли при заданных объемах конкурентов для фирмы будет иметь следующий вид:

$$\Pi_i = P(Q)q_i - MC_i(q_i) \to \max. \tag{5}$$

3. Математическая постановка задачи

Для оценки уровня монопольной власти необходима система специализированных показателей. Таким показателем может выступать коэффициент Лернера [7], упомянутый ранее. Другим показателем является индекс Херфиндаля – Хиршмана, который рассчитывается как сумма квадратов рыночных долей всех фирм определенной отрасли [6]:

$$HHI = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \cdots + s_n^2, \tag{6}$$

где HHI – значение индекса Херфиндаля – Хиршмана; s – доля фирмы в общем объеме выпуска отрасли; n – количество фирм в отрасли.

Анализ уровня монополизации рынка может основываться на отдельных показателях, однако комплексные модели дают более репрезентативную оценку. В качестве базового инструментария используются показатели концентрации рынка [8]. По методу расчета они делятся на две группы: прямые и косвенные [9]. К прямым можно отнести такие индексы, как индекс Лернера [10].

Косвенные показатели отличаются своей разнообразностью, среди которых: индекс Херфиндаля – Хиршмана, число фирм на рынке, коэффициент относительной концентрации и другие.

Наглядным является индекс рыночной концентрации [11, 12], который рассчитывается по формуле

$$CR = \sum_{i=1}^{k} s_i, \tag{7}$$

где k – количество крупных фирм; s – доля фирмы в общем объеме выпуска отрасли; i – индекс фирм в отрасли.

Количество фирм k определяется исследователем на основе целей анализа и выбирается как фиксированное число крупнейших компаний на рынке. Это число не равно общему количеству фирм в отрасли.

В олигополии фирмы действуют стратегически, и рыночная цена зависит от долей участников рынка. Введем частный индекс Лернера L_i для i-й фирмы и используем модель эластичности по выручке E_{p-v}, описанную в работах [13, 14]:

$$L_i = \frac{P - MC_i}{P}; \tag{8}$$

$$E_{p-v} = \frac{p - v_i}{p} E, \tag{9}$$

где E_{p-v} – эластичность по прибыли; E – эластичность спроса; v_i – переменные издержки; MC_i – предельные издержки.

В разных моделях используют разное обозначение для переменных издержек. В данном случае будем считать, что $v_i \equiv MC_i$.

Продифференцируем функцию прибыли по q_i:

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial q_i} = P(Q) + q_i \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial Q}\right) \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial q_i}\right) - MC_i(q_i) = 0. \tag{10}$$

Поскольку $\frac{\partial Q}{\partial q_i} = 1$ и при условии, что фирма i считает выпуски конкурентов фиксированными, получим

$$P + q_i \cdot P'(Q) - MC_i = 0. \tag{11}$$

Преобразуем полученное уравнение:

$$P - MC_i = -q_i \cdot P'(Q); \tag{12}$$

$$\frac{P - MC_i}{P} = \frac{-q_i \cdot P'(Q)}{P} \tag{13}$$

Правую часть можно записать как

$$\frac{P - MC_i}{P} = \frac{-(q_i/Q) \cdot (P'(Q) \cdot Q)}{P}, \tag{14}$$

где $\frac{q_i}{Q} = s_i$ – рыночная доля фирмы i; $\frac{P'(Q) \cdot Q}{P} = -\frac{1}{E}$, так как это величина, обратная эластичности рыночного спроса по цене.

Из этого можно сделать вывод, что частный индекс L_i для i-й фирмы принимает вид:

$$L_i = \frac{s_i}{E}. \tag{15}$$

Тогда эластичность спроса будет выглядеть следующим образом:

$$E = \frac{s_i}{L_i}. \tag{16}$$

Из приведенных ранее преобразований получена модель эластичности по прибыли через частный индекс Лернера:

$$s_i = EL_i. \tag{17}$$

4. Исходные данные

В качестве исходных данных использованы открытые данные по финансовой отчетности российских организаций. Источником информации является сервис Государственного информационного ресурса бухгалтерской отчетности ФНС России [15]. Для примера в донной статье организации выбирались по ОКВЭД-2: 27.12 «Производство электрической распределительной и регулирующей аппаратуры». В общей сложности были обработаны 140 организаций, из которых выделена 21 организация с выручкой более 500 млн руб. в период с 2019 по 2024 г.

В табл. 1 представлены данные по выручке 21 крупнейшей организации в отрасли за период с 2019 по 2024 г.

Таблица 1

Данные по выручке для организаций

Table 1

Revenue data for organizations

№	Наименование	Выручка, тыс. руб.					
		2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	ООО «МЭЩ»	1 616 415	967 861	1 344 094	1 799 693	4 112 738	10 415 980
2	АО «НПОТЭЛ»	2 460 437	3 802 331	5 634 016	6 850 337	10 442 895	10 228 176
3	ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»	2 567 204	2 734 975	3 197 997	3 222 393	4 597 856	7 113 338
4	ООО «НПО «ГАЗТЕХНОМАШ»	1 076 808	712 674	552 108	589 893	143 279	2 188
5	ООО «ПАРУС ЭЛЕКТРО»	1 357 310	1 917 718	1 440 925	2 419 037	5 004 832	6 355 786
6	ПАО «ТЕНЗОР»	660 228	1 729 418	1 611 230	1 614 788	2 927 254	4 658 863
7	ООО «ЧЭТА»	2 510 600	2 825 316	2 009 472	4 009 638	5 465 067	5 444 136
8	ООО «МИРТЕК»	3 751 833	2 815 083	4 268 041	5 287 766	4 664 269	3 682 284
9	ООО «СИСТЕМОТЕХНИКА»	753 455	983 831	1 895 896	3 641 251	3 696 218	5 579 897
10	ООО «ЭЛТЕРА»	1 086 805	1 266 483	2 393 973	2 416 632	3 191 229	3 014 402
11	ООО «ТЭМЗ»	1 293 080	1 128 101	2 138 360	2 556 446	4 707 101	5 162 753
12	ООО НПП «ТЭК»	1 900 708	1 480 345	2 266 999	2 798 908	3 563 252	4 125 825
13	АО «ЭЛЕКТРОНМАШ»	2 082 408	2 121 748	3 323 029	2 913 180	4 061 165	4 267 012
14	ООО «НПО «ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКА»	512 916	1 375 440	190 865	203 204	2 025 565	3 633 838
15	АО «ИНТЕХКОМ»	1 399 226	1 404 214	1 346 312	1 176 985	2 457 518	3 911 774
16	ООО «СЭЗЭМ»	3 916 338	4 097 579	3 805 712	1 675 748	1 884 159	1 756 046
17	ООО «ЭП-А»	303 652	879 725	1 051 859	1 557 603	3 438 946	3 677 364
18	АО «НИПОМ»	684 240	727 690	1 450 404	2 138 621	3 332 273	2 269 479
19	ООО «ТСН-ЭЛЕКТРО»	1 276 087	1 589 594	2 470 947	2 277 097	2 658 551	3 335 019
20	ЗАО «БАСТИОН»	878 599	996 484	1 379 817	1 791 149	3 229 417	1 859 550
21	ООО «ШТИЛЬ ЭНЕРГО»	389 733	547 925	921 589	1 299 270	1 923 626	3 041 110

5. Результаты численного моделирования

На основе полученных данных был произведен расчет индексов Лернера, Херфиндаля – Хиршмана, оценены доли рынка и эластичность. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчеты для организаций

Table 2

Calculations for organizations

Наименование	v	R^2	Коэффициент Лернера	Доля рынка, %	HHI, %	Оценка эластичности
ООО «МЭЩ»	0,7702	0,9620	0,230	11,14	1,24	0,4845
АО «НПОТЭЛ»	0,7942	0,9846	0,206	10,94	1,20	0,5313
ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»	0,5988	0,9738	0,401	7,61	0,58	0,1896
ООО «НПО «ГАЗТЕХНОМАШ»	0,9256	0,9995	0,074	0,00	0,00	0,0003
ООО «ПАРУС ЭЛЕКТРО»	0,7829	0,9931	0,217	6,80	0,46	0,3129
ПАО «ТЕНЗОР»	0,8270	0,9881	0,173	4,98	0,25	0,2879
ООО «ЧЭТА»	0,6649	0,9479	0,335	5,82	0,34	0,1737
ООО «МИРТЕК»	0,7670	0,9480	0,233	3,94	0,15	0,1690
ООО «СИСТЕМОТЕХНИКА»	0,7557	0,9925	0,244	5,97	0,36	0,2442
ООО «ЭЛТЕРА»	0,8365	0,9921	0,163	3,22	0,10	0,1972
ООО «ТЭМЗ»	0,7786	0,9957	0,221	5,52	0,30	0,2494
ООО НПП «ТЭК»	0,8557	0,9908	0,144	4,41	0,19	0,3058
АО «ЭЛЕКТРОНМАШ»	0,8959	0,9938	0,104	4,56	0,21	0,4384
ООО «НПО «ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКА»	0,9657	0,9999	0,034	3,89	0,15	1,1322
АО «ИНТЕХКОМ»	0,7465	0,9714	0,254	4,18	0,17	0,1650

Окончание табл. 2
Table 2 (end)

Наименование	v	R^2	Коэффициент Лернера	Доля рынка, %	HHI, %	Оценка эластичности
ООО «СЭЗЭМ»	0,9604	0,9961	0,040	1,88	0,04	0,4738
ООО «ЭП-А»	0,8057	0,9906	0,194	3,93	0,15	0,2023
АО «НИПОМ»	0,7777	0,9783	0,222	2,43	0,06	0,1091
ООО «ТСН-ЭЛЕКТРО»	0,9635	0,9994	0,036	3,57	0,13	0,9782
ЗАО «БАСТИОН»	0,7993	0,9693	0,201	1,99	0,04	0,0990
ООО «ШТИЛЬ ЭНЕРГО»	0,7023	0,9981	0,298	3,25	0,11	0,1092
Итог по отрасли:			0,234	100,00	0,0623	

Определим значение эластичности как коэффициент регрессионной зависимости доли рынка и индекса Лернера на основании (17). На рис. 2 показана зависимость рыночной доли s_i от индекса Лернера L_i. Согласно рис. 2, оценка эластичности составляет $E_{\text{рег}} = 0{,}2242$.

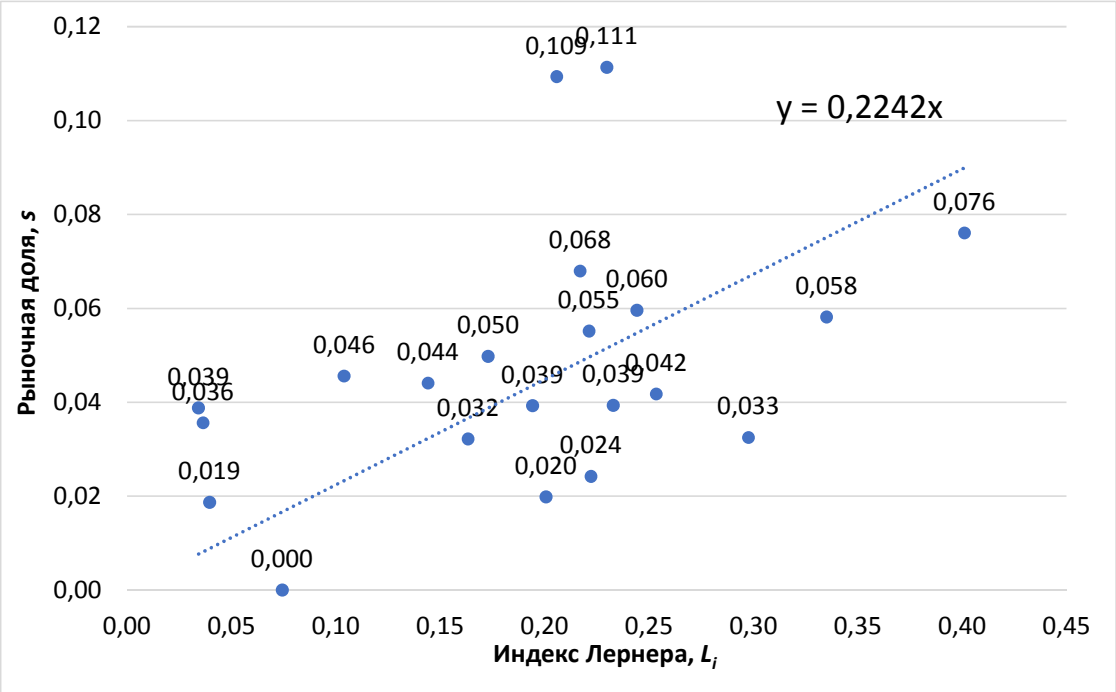


Рис. 2. Зависимость индекса Лернера от рыночной доли (регрессионная зависимость)
Fig. 2. Dependence of the Lerner index on market share (regression dependence)

Заключение

Исследование, проведенное в рамках данной статьи, позволило осветить проблему ценообразования в олигополистической среде через модель индекса Лернера, раскрывая взаимосвязь между структурой рынка, рыночной властью и финансовыми показателями фирм.

Выявлено, что каждая из организаций формирует определенный тип рыночного равновесия, отличающийся механизмом координации цен и объемов. При этом общее свойство всех моделей – цена превышает предельные издержки, что и послужило основанием для введения индекса Лернера как количественного показателя рыночной власти.

Была выведена формула зависимости индекса Лернера и эластичности спроса, а также взаимосвязь индекса Лернера с индексом Херфиндаля – Хиршмана. Это позволило интерпретировать индекс Херфиндаля – Хиршмана не только как меру концентрации, но и как структурный множитель рыночной власти.

Метод адаптируем к любым олигополистическим структурам, где возможно собрать данные по ценам и издержкам. Показано, что индекс Лернера может выступать инструментом мониторинга конкурентной среды и оценки последствий рыночной концентрации.

Предложен метод оценки эластичности рынка на основании индекса Лернера и доли рынка. Собраны данные по отрасти ОКВЭД-2: 27.12 «Производство электрической распределительной и регулирующей аппаратуры». Приведены расчеты оценочного значения эластичности спроса.

Практическое значение результатов: для предприятий модель позволяет количественно оценивать эластичность спроса, собственную рыночную власть и определять оптимальные ценовые стратегии в условиях олигополистического равновесия.

Разработанный подход объединяет теорию стратегического взаимодействия фирм, структурный анализ рынка и эконометрику финансовых показателей, формируя целостную систему оценки рыночной власти.

В ходе работы выявлен ряд направлений, требующих дальнейшего развития: интеграция индекса Лернера с динамическими показателями для анализа устойчивости прибыли к изменениям рыночных параметров, а также расширение модели на многоотраслевые рынки и взаимосвязанные олигополии.

В результате исследования подтверждена гипотеза о том, что модель Лернера в связке с эластичностью по прибыли можно применять к подходу по максимизации прибыли на предприятиях.

Список литературы

1. Современные тенденции развития корпораций / С.Н. Суетин, Л.П. Объедкова, В.А. Матосян и др. // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-2. С. 6.

2. Кажуро Н.Я. Конкуренция как механизм рынка // Наука и техника. 2015. № 4. С. 77–84.

3. Ивановская И.В., Карпенко Е.М. Механизм ценообразования на рынке с ограниченной конкуренцией. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2010. 160 с.

4. Лернер А.П. Понятие монополии и измерение монопольной власти // Вехи экономической мысли. Т. 5: Теория отраслевых рынков / под общ. ред. А.Г. Слуцкого. СПб.: Экономическая школа, 2003. С. 536–566.

5. Блюмин И.Г. Теория Курно // Критика буржуазной политической экономии. В 3 т. Т. I: Субъективная школа в буржуазной политической экономии. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 491–532.

6. Дюсуше О.М. Статичное равновесие Курно – Нэша и рефлексивные игры олигополии: случай линейных функций спроса и издержек // Экономический журнал ВШЭ. 2006. № 1. С. 3–32.

7. Куцегреева Л.В. Антимонопольная политика и антимонопольное регулирование процессов ценообразования в РФ // Потенциал современной науки. 2015. № 4 (12). С. 108–113.

8. Бакайкина А.В. Применение индекса Лернера к оценке конкуренции на рынке кредитования малого и среднего бизнеса в России // Финансы и кредит. 2015. № 23 (647). С. 17–30.

9. Челнокова О.Ю. Моделирование использования индекса Херфиндаля – Хиршмана при анализе степени концентрации фирм на отраслевом рынке // Профессиональная ориентация. 2018. № 2. С. 54–58.

10. Рабданова А.В., Булатова В.Б. Оценка конкурентных позиций коммерческих банков // Байкальские экономические чтения. Социально-экономическое развитие регионов: проблемы и перспективы. 2016. С. 168–171.

11. Сказина К.Е. Показатели конкурентоспособности предприятия // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами. 2016. С. 188–191.

12. Гамбаров Г.О. О коэффициентах рыночной концентрации: информационно-аналитический материал. М.: Центральный банк Российской Федерации, 2023. 10 с.

13. Dranko O.I., Belova A.S. On Rational Decisions under Different Criteria: Profit Pricing Policy // 2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, Russian Federation, 2024. P. 240–243.

14. Dranko O.I., Belova A.S. Price Optimization Method for Highly Technological Products // 2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). Sochi, Russian Federation, 2025. P. 822–826.

15. Государственный информационный ресурс бухгалтерской (финансовой) отчетности. URL: https://bo.nalog.ru/ (дата обращения: 01.11.2025).

References

1. Suetin S.N., Obedkova L.P., Matosyan V.A., Suetin A.N., Ilin S.Yu. Modern trends of corporations. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;(1-2):6. (In Russ.)

2. Kazhuro N.Ya. Competition as market mechanism. *Science & Technique*. 2015;(4):77–84. (In Russ.)

3. Ivanovskaya I.V., Karpenko E.M. *Mekhanizm tsenoobrazovaniya na rynke s ogranichennoy konkurentsiyey* [Pricing Mechanism in a Market with Limited Competition]. Gomel: Sukhoi State Technical University of Gomel, 2010. 160 p. (In Russ.)

4. Lerner A.P. The concept of monopoly and the measurement of monopoly power. In: *Slutskiy A.G. (Ed.). Milestones in Economic Thought Vol. 5*. St. Petersburg: Economic School, 2003. P. 536–566. (In Russ.)

5. Blyumin I.G. *Teoriya Kurno* [Cournot Theory]. In: *Kritika burzhuaznoy politicheskoy ekonomii: v 3 t. T. I: Sub"ektivnaya shkola v burzhuaznoy politicheskoy ekonomii* [Critique of Bourgeois Political Economy: in 3 volumes. Vol. I: Subjective School in Bourgeois Political Economy]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. P. 491–532. (In Russ.)

6. Dyusouche O.M. [Static Cournot–Nash equilibrium and reflexive oligopoly games: the case of linear demand and cost functions]. *Higher schools of Economics economic journal*. 2006;(1):3–32. (In Russ.)

7. Kutsegreeva L.V. [Antimonopoly policy and antimonopoly regulation of pricing processes in the Russian Federation]. *Potential of modern science*. 2015;4(12):108–113. (In Russ.)

8. Bakaikina A.V. Applying the Lerner index to assess competition in the Russian SME lending market. *Finance and Credit*. 2015;23(647):17–30. (In Russ.)

9. Chelnokova O.Yu. [Modeling the Use of the Herfindahl-Hirschman Index in Analyzing the Degree of Firm Concentration in an Industry Market]. *Professional Guidance*. 2018;(2):54–58. (In Russ.)

10. Rabdanova A.V., Bulatova V.B. [Assessment of competitive positions of commercial banks]. In: *Baikal Economic Readings. Socio-economic development of regions: problems and prospects*. 2016. P. 168–171. (In Russ.)

11. Skazina K.E. Indicators of enterprise competitiveness. In: *Development of the theory and practice of managing social and economic systems*. 2016. P. 188–191. (In Russ.)

12. Gambarov G.O. *O koeffitsiyentakh rynochnoy kontsentratsii: informatsionno-analiticheskiy material* [On market concentration coefficients: information and analytical material]. Moscow: Central Bank of the Russian Federation, 2023. 10 p. (In Russ.)

13. Dranko O.I., Belova A.S. On Rational Decisions under Different Criteria: Profit Pricing Policy. In: *2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, Russian Federation, 2024. P. 240–243.

14. Dranko O.I., Belova A.S. Price Optimization Method for Highly Technological Products. In: *2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. Sochi, Russian Federation, 2025. P. 822–826.

15. *Gosudarstvennyy informatsionnyy resurs bukhgalterskoy (finansovoy) otchetnosti* [State information resource for accounting (financial) reporting]. (In Russ.) Available at: https://bo.nalog.ru/ (accessed 01.11.2025).

Информация об авторах

Дранко Олег Иванович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Крупномасштабные системы», Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; olegdranko@gmail.com.

Белова Анна Сергеевна, инженер лаборатории «Интеллектуальные системы управления и моделирования», Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; belova@ipu.ru.

Information about the authors

Oleg I. Dranko, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of Large-Scale Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; olegdranko@gmail.com.

Anna S. Belova, Engineer at the Laboratory of Intelligent Control Systems and Modeling. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; belova@ipu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.11.2025
The article was submitted 02.11.2025

Научная статья
УДК 63.009.34
DOI: 10.14529/ctcr260108

РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ПРОЕКТАМИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

***С.А. Баркалов**, bsa610@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6183-3004*
***А.В. Белоусов**, alexbelousov19@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1464-298X*
***Е.А. Серебрякова**, sea-parish@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5129-246X*
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В данной работе рассматриваются основные подходы к формированию стратегий управления сложными проектами на основе методов машинного обучения с подкреплением. Масштаб и разнообразие задач сложных проектов, количество исполнителей и используемых ресурсов могут создавать весьма сложные комбинаторные схемы, поэтому эффективное оперативное интерпретирование таких структур и принятие обоснованных решений, гарантирующих соблюдение сроков, представляют собой значительную сложность. Чтобы преодолеть обозначенные сложности, применяются интеллектуальные системы, способные анализировать и предсказывать временные и ресурсные характеристики, относящиеся как к отдельным задачам, так и к их совокупности. Такой процесс интегрирован в марковскую модель принятия решений. В ее состав входит разработка системы показателей как количественных, так и качественных, предназначенных для оценки работы проектов. Все эти аспекты играют существенную роль в определении тех технических и экономических рисков, которые могут возникнуть в процессе реализации проектов путем определения стратегий. **Цель исследования** заключается в формировании интеллектуальной модели и алгоритма принятия решений при выборе стратегий реализации сложных проектов на основе моделей машинного обучения с подкреплением. **Методы исследования.** Для решения задачи выбора стратегий управления сложными проектами использовалась марковская модель принятия решений, используемая для оценки ценности состояний и действий агента при выборе стратегий на основе метода temporal difference. В результате оценка ценности действий производилась на основе алгоритма SARSA, позволяющего получить оптимальные варианты действий на каждой задаче выполнения проекта в зависимости от факторов внутренней и внешней неопределённости. **Результаты.** Представленные в статье методы предоставляют эффективный инструмент для оперативного разрешения широкого спектра задач, неизбежно возникающих при воплощении сложных проектов, учитывая как внутренние, так и внешние факторы неопределенности. Благодаря использованию модели машинного обучения с подкреплением, основанной на марковском процессе, создается основа для системы поддержки принятия решений. Эта система способна динамически оценивать ход выполнения проекта и формировать адаптивные и точные стратегии с низким уровнем погрешности. В ее структуру могут быть интегрированы различные подмодели, такие как регрессии, классификаторы, кластеризаторы и глубокие нейронные сети. **Заключение.** Полученные результаты в полной мере применимы для формирования эффективных стратегий управления сложными проектами. Доказано, что использование марковских моделей принятия решений в полной мере позволяет нивелировать неопределённость при определении характера закона распределения случайной величины генеральной совокупности данных, необходимых для обучения проекта. Кроме того, дискретность в МППР соответствует характеру формирования и управления сложным проектом, осуществляемым варьированием параметров ε и γ, а в случае, когда проект длится значительное время, возможно использование параметра β, эффективность применения которого подлежит дальнейшим исследованиям.

Ключевые слова: алгоритм, марковская модель принятия решений, граф, обучение с подкреплением, стратегии, таблица ценности действий

Для цитирования: Баркалов С.А., Белоусов А.В., Серебрякова Е.А. Разработка стратегий управления сложными проектами на основе алгоритмов обучения с подкреплением // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 90–101. DOI: 10.14529/ctcr260108

© Баркалов С.А., Белоусов А.В., Серебрякова Е.А., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260108

DEVELOPMENT OF STRATEGY OF MANAGEMENT OF THE DIFFICULT PROJECTS ON THE BASIS OF TUTORING ALGORITHMS WITH THE REINFORCEMENT

***S.A. Barkalov**, bsa610@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6183-3004*
***A.V. Belousov**, alexbelousov19@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1464-298X*
***E.A. Serebryakova**, sea-parish@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5129-246X*
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. In this work the main approaches to formation of strategy of management of the difficult projects on the basis of methods of machine learning with a reinforcement are considered. The scale and a variety of tasks of the difficult projects, the number of performers and the used resources can create very the compound combinatory circuits therefore effective expeditious interpretation of such structures and adoption of the justified decisions guaranteeing keeping of terms represent the considerable complexity. To overcome the designated difficulties, the intellectual systems capable to analyze and predict the temporary and resource characteristics relating both to separate tasks, and to their set are applied. Such process is integrated into Markov model of a decision making. Development of the system of indexes as the quantitative, and the qualitative, intended for job evaluation projects is its part. All these aspects play an essential role in determination of those technical and economic risks which can arise during implementation of projects a path of definition of strategy. The research objective consists in formation of intellectual model and algorithm of a decision making when choosing strategy of implementation of the difficult projects on the basis of models of machine learning with a reinforcement**. Research techniques.** For the solution of a problem of the choice of strategy of management of the difficult projects the Markov model of acceptance of decisions used for assessment of value of states and actions of the agent when choosing strategy on the basis of the temporal difference method was used. As a result, assessment of value of actions was made on the basis of the algorithm SARSA allowing to receive optimal variants of actions on each problem of implementation of the project depending on factors of internal and external indeterminacy. **Results.** The methods presented in article provide the effective tool for operational permission of a wide range of the tasks which are inevitably arising at the embodiment of the difficult projects, considering both internal, and external factors of indeterminacy. Thanks to the model of machine learning with a reinforcement based on the Markovian process the basis for the system of support of a decision making is created. This system is capable to estimate dynamically the course of implementation of the project and to form adaptive and exact strategy with low level of an error. Various sub models, such as regressions, qualifiers, clustering and deep neural networks can be integrated into its structure. **Conclusion.** The received results in to the complete measure are applicable for formation of effective strategy of management of the difficult projects. It is proved that use of Markov models of a decision making fully allows to level indeterminacy when determining nature of the distribution law of a random value of a universe of the data necessary for tutoring of the project. Besides the discretization in MPPR corresponds to the nature of formation and management of the difficult project which is carried out by variation of parameters ε and γ and in case the project lasts the considerable time perhaps of use of parameter β which effectiveness of application is subject to further researches.

Keywords: algorithm, Markov model of a decision making, columns, tutoring with a reinforcement, strategy, action value table

For citation: Barkalov S.A., Belousov A.V., Serebryakova E.A. Development of strategy of management of the difficult projects on the basis of tutoring algorithms with the reinforcement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):90–101. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260108

Введение

В России проектная методология набирает все большую популярность во многих секторах экономики. Однако масштаб и разнообразие задач, исполнителей и используемых ресурсов могут создавать весьма сложные комбинаторные схемы. Эффективное оперативное интерпретирование таких структур и принятие обоснованных решений, гарантирующих соблюдение сроков, представляют собой значительную сложность. Чтобы преодолеть обозначенные сложности, приме-

няются интеллектуальные системы, способные анализировать и предсказывать временные и ресурсные характеристики, относящиеся как к отдельным задачам, так и к их совокупности. Эти системы способны оценивать риски и, в соответствии с текущей внутренней и внешней обстановкой, реализовывать альтернативные задачи. Такой процесс интегрирован в марковскую модель принятия решений [1]. В его состав входит разработка системы показателей как количественных, так и качественных, предназначенных для оценки работы проектов. Эти показатели дают возможность не только измерять эффективность проектов, но и прогнозировать их дальнейшее развитие. Подобные расчеты приобретают особую актуальность в связи с тем, что реализация сложных проектов неизбежно сталкивается с непредвиденными факторами, требующими оперативного анализа и корректировки стратегии выполнения задач. Применение такого подхода значительно повысит конкурентоспособность компаний и даст менеджерам возможность использовать передовые цифровые инструменты для управления. Эти инструменты интегрируют принципы машинного обучения с подкреплением и производственными операциями, что особенно важно в условиях существующего технологического диссонанса между этапами проектирования и воплощения в жизнь. При определении подходящих моделей необходимо принимать во внимание специфику конкретного производственного процесса, где на выбор оказывают влияние разнообразные как внешние, так и внутренние обстоятельства. Внутренние возможности компании формируются под влиянием ряда ключевых элементов. К ним относятся уровень ее технической базы, включающий применяемые технологии и программное обеспечение, отвечающие требованиям современных цифровых решений; финансовое состояние, обеспечивающее стабильность и возможность инвестиций; квалификация персонала и его готовность к освоению новых, конкурентных технологий. Все эти аспекты играют существенную роль в определении тех технических и экономических рисков, которые могут возникнуть в процессе реализации проектов. Выбор методик прогнозирования, планирования и управления напрямую зависит от этих факторов. Однако если при составлении прогнозов не учитывать их воздействие, то результаты могут оказаться неточными [1, 2]. В результате реальные показатели выполнения проектов и работы компаний могут существенно расходиться с прогнозируемыми значениями.

Постановка задачи

Некоторые проекты обладают высокой степенью инновационности, что часто сопровождается дефицитом или полным отсутствием статистических данных. Длительный срок реализации многих проектов также создает трудности в применении регрессионных моделей для прогнозирования показателей. При недостаточном объеме данных для достоверного определения распределения генеральной совокупности применяются методы повторной выборки, известные как ресемплинг [1, 3]. Ресемплинг позволяет минимизировать риск ошибочных выводов, связанных с гипотезой о распределении. В контексте управления сложными проектами эффективным вариантом ресемплинга выступает бутстрэп. Для создания классификаторов и регрессоров в таких проектах хорошо зарекомендовали себя ансамблевые методы, основанные на адаптивном бустинге.

Анализируем подход адаптивного бустинга в контексте бинарной классификации [4]. Предположим, что задан таргет

$$Y = \{-1, +1\},$$

признаковое множество

$$D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_d, y_d)\},$$

тогда цель заключается в тренировке ансамбля, состоящего из множества (M) моделей.

Итоговая модель будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{f}_M(x) = \mathrm{sign}(\textstyle\sum_{m=1}^{M} \rho_m a_m(x)), \quad (1)$$

где ρ_m – поправочные коэффициенты для базовых алгоритмов $a_m(x)$.

Введем следующие весовые коэффициенты:

$$w_{i,M} = \exp(-y_i \textstyle\sum_{m=1}^{M} \rho_m a_m(x_i));$$

$$\widetilde{w}_{i,M} = \frac{w_{i,M-1}}{\sum_j w_{j,M-1}}.$$

В таком случае алгоритм, основанный на адаптивном бустинге [1, 5], будет функционировать следующим образом:

1. Задаем начальные значения для весов $w_{i,1}$, где $i \in [1, d]$ (при этом значение весов рассчитывается как $\frac{1}{d}$, т. е. $w_{i,1} \leftarrow \frac{1}{d}$).

2. Обучим базовые алгоритмы:

2.1. Пусть $a_m (m \in [1, M])$ – базовый алгоритм с достаточно незначительной ошибкой

$$N(a_m, \widetilde{w}_m) \leftarrow \sum_{i=1}^{d} \widetilde{w}_{i,m} 1(y_i a_m(x_i) \leq 0) \quad (2)$$

и коэффициентами

$$a_m : p_m \leftarrow \frac{1}{2} \log \frac{1 - N(a_m, \widetilde{w}_m)}{N(a_m, \widetilde{w}_m)}.$$

В рамках обработки каждой записи выборки, то есть выполняя итерацию от 1 до *d*, мы будем обновлять значения коэффициентов $w_{i,m+1}$ и $\widetilde{w}_{i,m+1}$:

$$w_{i,m+1} \leftarrow w_{i,m} \exp\left(-\rho_m y_i a_m(x_i)\right), \quad (3)$$

$$\widetilde{w}_{i,m+1} \leftarrow \frac{w_{i,m+1}}{\sum_{j=1}^{d} w_{j,m+1}}.$$

2.2. Повысим эффективность модели путем обновления ее состава:

$$f_m \leftarrow \sum_{s=1}^{m} \rho_m a_m(x_i). \quad (4)$$

3. Тогда результирующая модель будет выглядеть как

$$\hat{f}_m = \mathrm{sign}(f_m). \quad (5)$$

Определившись с ансамблем моделей, необходимо выбрать аппарат для управления сетевым графиком реализации сложного проекта с учетом следующих недостатков, присущих сложным проектам [6, 7]:

– используемые в сложных проектах параметры представляют собой случайные величины, законы распределения которых меняются в процессе работы. Основанные на точечных оценках модели не всегда точны, что может вызвать задержку принятия решений и не позволить добиться желаемых результатов;

– сложные проекты, управляемые по жесткому календарному графику, демонстрируют низкую гибкость. Это часто влечет за собой несвоевременность и неточность действий, которые чаще всего представляют собой реакцию на негативные внешние и внутренние обстоятельства. В таких ситуациях исправление ошибок становится сложным и дорогостоящим;

– не всегда незначительные краткосрочные неудачи приводят к глобальным потерям. Однако постоянная попытка исправить их может негативно повлиять на общий прогресс и эффективность долгосрочных задач.

Среди существующих подходов особенно перспективны модели reinforcement learning (RL), поскольку они предоставляют широкие возможности для разработки гибких стратегий принятия решений (ПР) в сложных проектах. Ключевое отличие RL заключается в отсутствии заранее заданных целевых значений (откликов). Обучение в таких моделях направлено на формирование стратегий агента таким образом, чтобы он максимизировал общую сумму полученных «наград» [1, 7].

Обучение модели учитывает случайную природу всех входящих в нее переменных, что позволяет оперативно корректировать стратегии в краткосрочном плане. При этом долгосрочная стратегическая цель остается неизменной: обеспечение организационно-технологической надежности при выполнении сложных задач. Для достижения этой цели эффективно применяются марковские процессы принятия решений, основанные на определенной четверке параметров (*S, A, R, P*), описанных в [1, 8]:

S – различные фазы функционирования агента (этапы исполнения расписания сложного проекта);

A – набор операций, которые агент способен совершить (в рамках функционирования сложного проекта);

$R: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$ – механизм вознаграждения, активирующийся при переходе между состояниями S и S', если выполнено конкретное действие *a*;

$P: S \times A \rightarrow \pi(S)$ – граф переходов между состояниями описывается набором вероятностных распределений, где каждое распределение относится к множеству *S*. При этом вероятность перехода в следующее состояние не зависит от истории предыдущих состояний, т. е.

$$P_k\left(S_{t+1} = s' \middle| S_t, a_t, r_t, S_{t-1}, a_{t-1}, r_{t-1}, \dots, S_0, a_0\right) = P_k\left(S_{t+1} = s' \middle| S_t, a_t\right). \quad (6)$$

Следовательно, переход агента в новое состояние на очередном шаге определяется исключительно его нынешним состоянием и принятым решением. Данная система правил МППР отлично подходит для оценки эффективности исполнения сложного проекта и определения корректирующих действий при отклонениях от плана [8].

В силу предопределенного числа этапов, свойственного сложным проектам, мы имеем дело с конечным марковским процессом принятия решений. Задача завершения проекта соответствует терминальной узловой точке графа МППР. В рамках обучения мы примем во внимание оценку ожидаемой пользы после совершения шага *t*:

$$G_t = r_{t+1} + r_{t+2} + \cdots + r_T, \quad (7)$$

где r_{t+i} – система поощрений для агента, принимающего решение a_k в актуальном состоянии;

r_T – награда за совершение шага, который приводит к завершению работы системы.

Ввиду сложности толкования полученных данных о предполагаемой выгоде мы примем ее за основу при определении стратегии реализации сложного проекта:

$$G_t = r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \cdots + \gamma^{T-t-1} r_T, \quad (8)$$

где $\gamma \in [0,1]$ – коэффициент дисконтирования, позволяющий управлять выбором стратегий реализации сложного проекта (когда его значение приближается к нулю, для ЛПР приоритетом становится получение максимального результата на данном этапе проекта [9]. В остальных ситуациях ЛПР предпочитает реализовать проект в полном объеме, соблюдая сроки и заданное качество (такой подход носит долгосрочный характер).

Далее необходимо оценить ценность различных состояний и действий, исходя из полученной выгоды, которая будет реализована в рамках выбранной стратегии реализации сложного проекта, учитывая ранее проанализированные случайные факторы.

В этом случае значение функции *S*, которая отражает ценность состояний (достижимых результатов проекта), определяется при применении данной стратегии π:

$$\upsilon_\pi(s) = M_\pi(\textstyle\sum_{k=0}^{T} \gamma r_{t+k+1} | s_t = s), \quad (9)$$

где $s \in S$, т. е. оценить текущее состояние графиков проекта можно лишь на основе имеющихся задач.

Следовательно, модификация состояния влечет за собой трансформацию задач и, как следствие, приводит к изменению ее ценности как в краткосрочном, так и в долгосрочном аспектах для проекта [10]. Далее обратим внимание на функцию, определяющую ценность действий, обозначенных как *a*, для задачи *s* при применении стратегии π:

$$q_\pi(s,a) = M_\pi(\textstyle\sum_{k=0}^{T} \gamma r_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a). \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) рассчитывают среднее значение полученных вознаграждений для ЛПР, если он примет определенные решения в рамках строительного проекта. В расчетах учитывается дисконтирование вознаграждений, а также внутренние и внешние факторы неопределенности [10, 11].

С учетом понимания ключевых характеристик строительного проекта мы можем использовать рекуррентные формулы для определения функций ценности [11]. Предполагая, что известны вероятностные показатели переходов между задачами (*s* и *s′*) при осуществлении работ *a:*

$$P_{ss'}^{a} = P(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a). \quad (11)$$

Система вознаграждений для ЛПР при выборе задач теперь полностью сформирована:

$$R_{ss'}^{a} = M_\pi(r_{t+1} | s_t = s, a_t = a, s_{t+1} = s'). \quad (12)$$

В настоящее время мы можем сформулировать уравнения Беллмана для определения стоимости состояний и действий в рамках выбранной стратегии:

$$\upsilon_\pi(s) = \textstyle\sum_{a \in A(s_t)}^{T} \pi(a|s) \sum_{s' \in S} P_{ss'}^{a} (R_{ss'}^{a} + \gamma \upsilon_\pi(s')), \quad (13)$$

$$q_\pi(s,a) = \textstyle\sum_{s' \in S} P_{ss'}^{a} (R_{ss'}^{a} + \gamma \upsilon_\pi(s')). \quad (14)$$

При определении стоимости задач в строительном проекте уравнение Беллмана отображает связь между ценностью текущей задачи и ценностью задач, которые следуют за ней [12]. Аналогично для функций ценности работ оно показывает, как ценность конкретной пары (задача, работа) определяется ценностью последующих пар подобных задач и работ.

Чтобы определить важность различных состояний и шагов в строительном проекте, сначала создается граф множественных прецедентных [13] отношений (МППР).

Пример такого графа представлен на рис. 1.

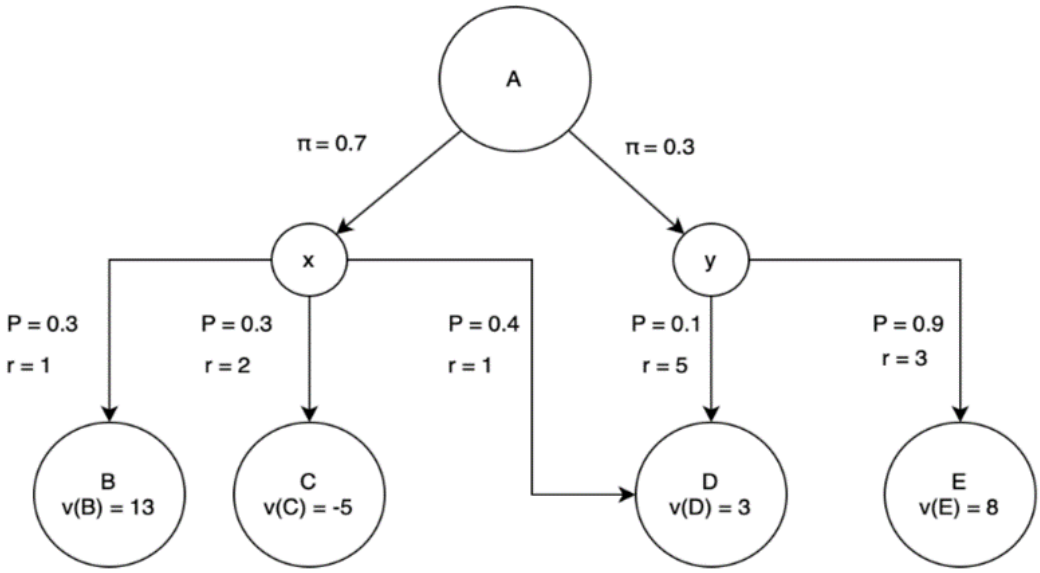


Рис. 1. Граф множественных прецедентных отношений (МППР)
Fig. 1. Count of the multiple case relations (MDP)

Теперь можно приступить к выбору стратегии управления сложным проектом. Для этого применим инструмент ε-жадной стратегии:

$$\pi_t(a|s_t) = \begin{cases} \frac{1-\varepsilon}{|A_t|} - \frac{\varepsilon}{|A(s_t)|}, a \in A_t \\ \frac{\varepsilon}{|A(s_t)|}, a \notin A_t \end{cases}, \quad (15)$$

которая в зависимости от заданного параметра ε позволяет переходить от жадной (с вероятностью $(1-\varepsilon)$)

$$\pi_t(a|s_t) = \frac{1}{|A_t|}$$

к абсолютно исследовательской стратегии (вероятность ε)

$$\pi_t(a|s_t) = \frac{1}{|A(s_t)|}.$$

К сожалению, в большинстве проектов не известны распределения вероятностей $P_{ss'}^{a}$ выбора доступных действий $\pi(a|s)$ для всех состояний, распределения вероятностей переходов в следующие состояния и математические ожидания $R_{ss'}^{a}$ получаемых при этом наград. Мы можем лишь задать коэффициент дисконтирования – γ и вероятность ε для ε-жадной стратегии, а также скорость обучения α – *learning rate.*

Тогда можно использовать алгоритм обучения с подкреплением SARSA, в котором для обновления ценности действий $q(s_t, a_t)$ используется значение $q(s_{t+1}, a_{t+1})$, т. е. ценность действия a_{t+1}, выбранного в состоянии s_{t+1} согласно некоторой установленной стратегии $\pi_{t+1}(a|s_{t+1})$. В этом случае применяем принцип **Temporal Difference (TD)** для оценки ценности состояния (задачи проекта):

$$v(s_t) \leftarrow v(s_t) + \alpha(r_{t+1} + \gamma v(s_{t+1}) - v(s_t)). \quad (16)$$

Интерпретируется данное выражение следующим образом: находясь в состоянии s_t (задачи проекта), агент, следуя какой-то стратегии, выполняет действие a_t (выбирает возможные операции для выполнения задачи проекта), получает за это награду r_{t+1} и переходит в состояние s_{t+1}. Ценность $v(s_{t+1})$ нового состояния s_{t+1} также известна, значит, можно обновить s_t.

В процессе обучения необходимо совершенствовать подход к определению значимости различных действий:

$$q(s_t, a_t) \leftarrow q(s_t, a_t) + \alpha(r_{t+1} + \gamma \max_{a \in A(s_{t+1})} q(s_{t+1}, a_{t+1}) - q(s_t, a_t)). \quad (17)$$

Вначале происходит присвоение значений всем действиям $a \in A(s)$, которые могут быть выполнены из каждого нетерминального состояния.

Затем агент проходит ряд игр. Начало каждой игры характеризуется случайным начальным нетерминальным состоянием агента.

Далее в рамках каждой игры на каждом шаге *t* агент, находясь в s_t (задаче проекта), выбирает действие a_t (из списка возможных действий) согласно выбранной стратегии (определяемой значением ε), переходит в s_{t+1} (следующую задачу) и получает r_{t+1}. Если задача проекта s_{t+1}, то выбирается действие a_{t+1}, а значение $q(s_t, a_t)$ пересчитывается методом TD:

$$q(s_t, a_t) \leftarrow q(s_t, a_t) + \alpha(r_{t+1} + \gamma \max_{a \in A(s_{t+1})} q(s_{t+1}, a_{t+1}) - q(s_t, a_t)). \quad (18)$$

Рассмотрим пример расчёта для графа МППР, изображенного на рис. 1.

Зададим $\gamma = 0{,}8$, $\alpha = 0{,}1$. Стратегия ε-жадная со значением ε = 0,1. Неизвестны ни вероятности переходов из состояния $\boldsymbol{s}$ в $\boldsymbol{s}'$ в результате выполнения действия a , ни то, какие награды получим в этом случае.

Все значения придется оценивать по ходу игры. Зададим матрицу ценности действий для инициализации алгоритма SARSA (табл. 1). Крестиками обозначены недоступные для данного состояния действия. Начальные ценности зададим равными нулю.

Таблица 1

Матрица ценности действий для инициализации алгоритма SARSA

Table 1

Matrix of value of actions for initialization of an algorithm SARSA

	a_1	a_2	a_3	a_4
s_1	0	0	×	×
s_2	0	×	×	0
s_3	×	0	0	
s_4	×	0		0
s_5	×	×	×	×

После выбора a_2 агент переходит в позицию S_2 и получает отрицательное вознаграждение в размере 2. В состоянии S_2 ему предстоит принять решение: выполнить действие a_1 или a_4. Ввиду равных значений, присвоенных обоим действиям (ноль), агент решает действовать по варианту a_4. Теперь можно обновить значение $q(s_1, a_2)$:

$$q(s_1, a_2) \leftarrow q(s_1, a_2) + \alpha(r + \gamma q(s_2, a_4) - q(s_1, a_2)) = 0 + 0{,}1(-2 + 0{,}8 \cdot 0 - 0) = -0{,}2.$$

Получим матрицу ценности действий на шаге 1 (табл. 2).

Таблица 2

Матрица ценности действий на шаге 1

Table 2

Matrix of value of actions on a step 1

	a_1	a_2	a_3	a_4
s_1	0	–0,2	×	×
s_2	0	×	×	0
s_3	×	0	0	
s_4	×	0		0
s_5	×	×	×	×

Продолжим работу алгоритма:

Текущее состояние – $\boldsymbol{s_2}$

Выбранное действие – $\boldsymbol{a_4}$

Следующее состояние – $\boldsymbol{s_5}$

Награда – 7

Игра заканчивается.

$q(s_2, a_4) \leftarrow 0 + 0{,}1\ (7 - 0) = 0{,}7.$

Теперь построим матрицу для оценки ценности действий для терминального состояния финитного марковского процесса принятия решений (табл. 3).

Таблица 3

Матрица ценности действий для терминального состояния

Table 3

Matrix of value of actions for a terminal state

	a_1	a_2	a_3	a_4
s_1	0	–0,2	×	×
s_2	0	×	×	0,7
s_3	×	0	0	
s_4	×	0		0
s_5	×	×	×	×

Проведя серию игр, получим результирующую табл. 4.

Таблица 4

Результирующая матрица

Table 4

The resulting matrix

	a_1	a_2	a_3	a_4
s_1	–0,32	0,88	×	×
s_2	–0,02	×	×	6,5
s_3	×	–0,09	–0,19	
s_4	×	0,99		6,14
s_5	×	×	×	×

Наша оценка совершенного действия тесно связана с будущими действиями: мы предвосхищаем их, что, в свою очередь, влияет на наше восприятие настоящего.

Пример выбора стратегии управления сложным проектом

В качестве примера разработанной стратегии выберем сложные строительные проекты на стадии возведения объекта с использованием информационной поддержки всех этапов реализации. Ввиду многообразия критериев, определяющих эффективность управления строительством, требуется разработка методики оценки достижения целей строительных проектов. Влияние погодных условий, выполнение обязательств со стороны субподрядчиков, стабильность поставок материалов и техники – лишь некоторые из факторов, которые могут вывести проект с намеченного курса, нарушить график и подрывать организационно-технологическую надежность на всех этапах жизненного цикла объекта. Таким образом, требуется разработка системы, которая будет предоставлять интеллектуальную помощь в процессе управления ИСП с применением алгоритмов машинного обучения для принятия решений.

Для определения оптимальных стратегий управления строительными проектами были задействованы данные из специального датасета – **Construction_Data_PM_Tasks_All_Projects.csv** [14]. Данный набор данных объединяет информацию о 12 424 проектах, в которых оценивается качество выполненных работ и уровень соблюдения правил безопасности на стройплощадке. Пример, иллюстрирующий структуру данного набора данных, представлен на рис. 2.

Данный набор данных охватывает сведения о таких параметрах, как идентификатор проекта, его текущий статус, географическое положение, название, дата запуска, категория, история изменений статуса, список выполняемых задач и общее количество задач.

Осталось определить стоимость каждого возможного состояния, исходя из выбранной стратегии. Эта стратегия, в свою очередь, будет сформирована на основе функции, учитывающей как внутренние, так и внешние факторы неопределенности, на которые мы можем влиять, меняя стратегии.

Для решения задачи использовалась игра Franka Kitchen из фреймворка Gymnasium-Robotics [15]. В качестве стратегии была использована ε-жадная стратегия с изменяемыми параметрами epsilon = (0,1–0,6), коэффициентами дисконтирования gamma = (0,6–0,9), параметр random_seed = 42, количество игр – 10 000.

```
pm_forms_data=pd.read_csv('/content/Construction_Data_PM_Tasks_All_Projects.csv')
pm_forms_data
```

0	T1.23963030	Open	JPC Project Management>EHS Management>01 Inspe...	task raised in incorrect location of this form...	14/09/2020	NaN	Safety Notice (Amber) - General Issue	Main Contractor	14/09/2020	FormAnswer	False	N
1	T116412.200	Closed	QC & BC(A)R>ITP 02 Architectural & M&E Service...	Metsec	14/09/2020	NaN	JPC - Progress Photo	Ceilings & Partitions	14/09/2020	NaN	False	T
2	T141663.27	EHS Good Observation	JPC Project Management>EHS Management>01 Inspe...	Good clear exclusion zones and access through ...	14/09/2020	NaN	Safety Notice (Green) - Good Observation	Main Contractor	14/09/2020	FormAnswer	False	T
3	T116412.199	Closed	QC & BC(A)R>ITP 02 Architectural &	RC walls	14/09/2020	NaN	JPC - Progress	Precast	14/09/2020	NaN	False	T

Рис. 2. Фрагмент набора данных Construction_Data_Tasks_Forms_All_Projects.csv
Fig. 2. Data set fragment Construction_Data_Tasks_Forms_All_Projects.csv

На рис. 3 приведен сравнительный анализ оценки ценности задач.

Рис. 3. Сравнительный анализ оценки ценности задач строительного проекта
Fig. 3. Comparative analysis of assessment of value of tasks of the structural project

Изучение рис. 3 показывает, что задачи с номерами 1328 и 1330 оказались самыми приоритетными, получив оценки 30,2 и 29,7 % соответственно. Все остальные задачи получили существенно более низкие оценки. Таким образом, при применении ε-жадной стратегии принимающий решения (ЛПР) будет первоначально сосредотачиваться на задачах, входящих в приоритетный план, а затем, по мере необходимости, обращаться к остальным задачам, следуя их ранжированию.

В последующем мы проанализируем полученные данные с точки зрения качества выполненных задач (рис. 4).

Изучение данных, представленных на рис. 4, выявило существенные различия между гистограммами. Помимо лидирующих показателей были получены неудовлетворительные результаты, что указывает на необходимость их корректировки путем изменения стратегий обучения.

В ходе обучения получен список приоритетных задач для реализуемых проектов в зависимости от факторов внешней неопределённости (рис. 5).

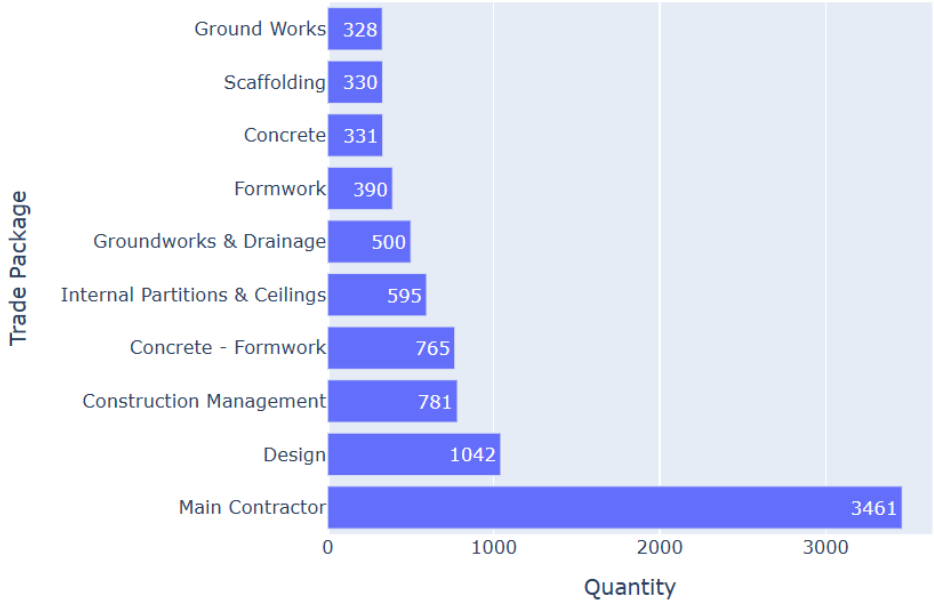


Рис. 4. Оценка ценности задач проекта по критерию качества
Fig. 4. Assessment of value of tasks of the project by criterion of quality

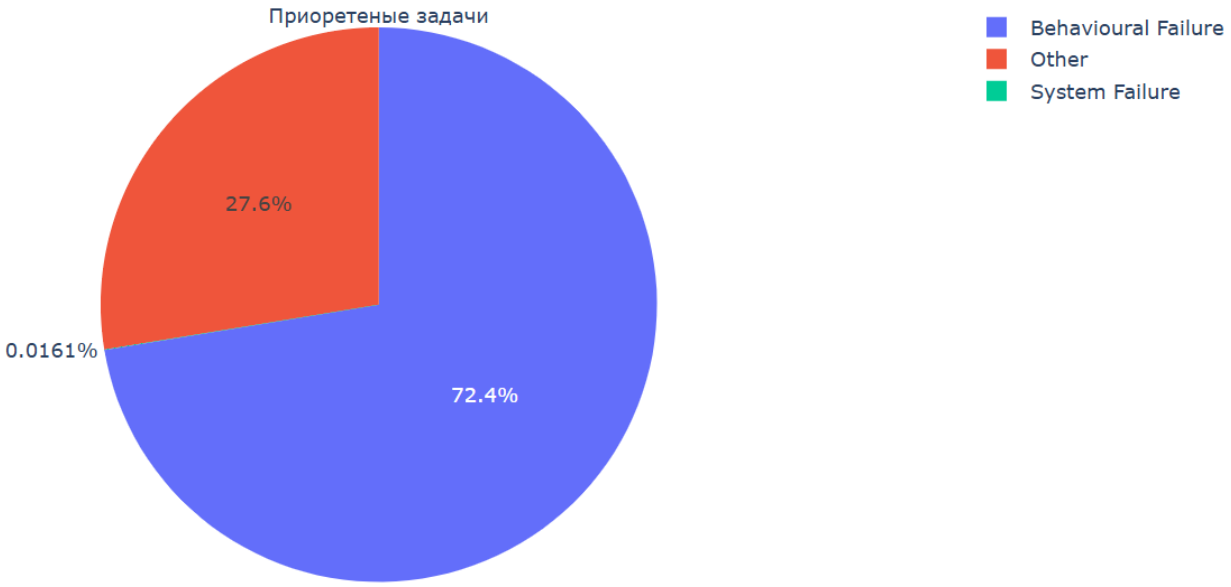


Рис. 5. Сравнительный анализ приоритетных задач проекта в зависимости от ценности состояний
Fig. 5. The comparative analysis of priority tasks of the project depending on the value of states

Только около 27,6 % задач идеально подходят для проекта. Остальные показывают значительную вариацию, что указывает на несовершенство выбранной стратегии и необходимость корректировки параметров вероятностных переходов между задачами в календарном графике.

Заключение

Представленные в статье методы предоставляют эффективный инструмент для оперативного разрешения широкого спектра задач, неизбежно возникающих при воплощении сложных проектов, учитывая как внутренние, так и внешние факторы неопределенности. Благодаря использованию модели машинного обучения с подкреплением, основанной на марковском процессе, создается основа для системы поддержки принятия решений. Эта система способна динамически оценивать ход выполнения проекта и формировать адаптивные и точные стратегии с низким уровнем погрешности. В ее структуру могут быть интегрированы различные подмодели, такие как регрессии, классификаторы, кластеризаторы и глубокие нейронные сети.

Полученные результаты в полной мере применимы для формирования эффективных стратегий управления сложными проектами. Доказано, что использование марковских моделей принятия решений в полной мере позволяет нивелировать неопределённость при определении характера закона распределения случайной величины генеральной совокупности данных, необходимых для обучения проекта. Кроме того, дискретность в МППР соответствует характеру формирования и управления сложным проектом, осуществляемым варьированием параметров ε и γ, а в случае, когда проект длится значительное время, возможно использование параметра β, эффективность применения которого подлежит дальнейшим исследованиям.

Список литературы

1. Грессер Лаура, Кенг Ван Лун. Глубокое обучение с подкреплением: теория и практика на языке Python. СПб.: Питер, 2022. 416 с.

2. Аверина Т.А., Половинкина А.И., Шумарин В.В. Управление рисками в условиях инновационного развития организации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 5. С. 87–89.

3. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Порядина В.Л. Механизмы активной экспертизы в задачах комплексного оценивания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 6. С. 64–66.

4. Белоусов В.Е., Баркалов С.А., Нижегородов К.А. Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий // Материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2019. Т. 1. С. 98–101.

5. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 2004. 341 с.

6. Галинская А.А. Модульные нейронные сети: обзор современного состояния разработок // Математические машины и системы. 2003. № 3-4. С. 87–102.

7. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10/12737/1087996

8. Вапник В.Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 295 с.

9. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.

10. Белоусов В.Е., Абросимов И.П., Губина О.В. Алгоритм идентификации состояний многоуровневой технической системы с использованием расплывчатых категорий модели представления знаний // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 3. С. 124–129.

11. Белоусов В.Е., Нижегородов К.И., Соха И.С. Алгоритмы получения упорядоченных правил предпочтения в задачах принятия решений при планировании производственных программ // Управление строительством. 2019. № 1 (14). С. 105–110.

12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine // The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.

13. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. М.: Финансы и статистика, 2001. С. 203–211.

14. Construction project data analysis. URL: https://www.kaggle.com/code/vadbel66/construction-project-data-analysis (дата обращения: 09.11.2025).

15. Gymnasium-Robotics is a collection of robotics simulation environments for Reinforcement Learning. URL: https://robotics.farama.org (дата обращения: 09.11.2025).

References

1. Gresser Laura, Keng Wang Loong. *Deep learning with a reinforcement: the theory and practice are always on the lips Python*. St. Petersburg: Piter, 2022. 416 p. (In Russ.)

2. Averina T.A., Polovinkina A.I., Shymarin V.V. Management of risks in the conditions of innovative development of organization. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2009;5(5):87–89. (In Russ.)

3. Barkalov S.A., Burkov V.N., Porjadina V.L. Mechanisms of active examination in problems complex estimation. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2009;5(6):64–66. (In Russ.)

4. Belousov V.E., Barkalov S.A., Nizhegorodov K.A. [Resource timing analysis in problems of scheduling of the construction enterprises]. In: *Materials of the XVI All-Russian school conference of young scientists "Management of big systems"*. Tambov: Tambov State Technical University Publ. 2019. Vol. 1. P. 98–101. (In Russ.)

5. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 341 p. (In Russ.)

6. Galinskaya A.A. [Modular neural networks: review of the current state of developments]. *Mathematical machines and systems*. 2003;(3-4):87–102. (In Russ.)

7. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ., 2020. 456 p. (In Russ.) ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10.12737/1087996

8. Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimosti po empiricheskim dannym* [Recovery of dependence according to empirical data]. Moscow: Nauka, 1979. 295 p. (In Russ.)

9. Cormen T., Leiserson Ch., Rivest R., Stein C. *Introduction to Algorithms*. Transl. from Engl. 2nd ed. Moscow: Williams, 2005. 1296 p. (In Russ.)

10. Belousov V.E., Abrosimov I.P., Gubina O.V. [An algorithm of identification of conditions of a multilevel technical system with use of indistinct categories of model of representation of knowledge]. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Systems analysis and information technologies*. 2017;(3):124–129. (In Russ.)

11. Belousov V.E., Nizhegorodov K.I., Soha I.S. Algorithms of obtaining the ordered rules of preference in problems of decision-making when planning production programs. *Upravleniye stroitel'stvom*. 2019;1(14):105–110. (In Russ.)

12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine. In: *The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.

13. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovanie: uchebnik* [Analysis of time series and forecasting. Textbook]. Moscow: Finansy i statistika, 2001. P. 203–211. (In Russ.)

14. Construction project data analysis. Available at: https://www.kaggle.com/code/vadbel66/construction-project-data-analysis. (accessed 09.11.2025).

15. Gymnasium-Robotics is a collection of robotics simulation environments for Reinforcement Learning. Available at: https://robotics.farama.org. (accessed 09.11.2025).

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Белоусов Алексей Вадимович, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; alexbelousov19@yandex.ru.

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Alexey V. Belousov, Postgraduate student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; alexbelousov19@yandex.ru.

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Branch Economy, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.11.2025

The article was submitted 11.11.2025

Научная статья
УДК 004.9, 658.5
DOI: 10.14529/ctcr260109

МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ТОРГОВО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

***О.В. Логиновский**, loginovskiiov@susu.ru, https://orcid.org/0000-0003-3582-2795*
***С.А. Браженко**, bsa@uralto.ru, https://orcid.org/0009-0004-3524-9882*
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В условиях цифровизации и усложнения производственно-сбытовых контуров торгово-производственных предприятий эффективность управления ограничивается не только регламентами и моделями, но и степенью автоматизации подготовки управленческих решений и качеством данных, используемых в контурах планирования, снабжения, производства, складской логистики и продаж. **Цель исследования:** разработать модель и методы информационного обеспечения автоматизации процессов управления и принятия решений, обеспечивающие сокращение цикла «событие – решение – действие» и получение измеримого экономического эффекта на показателях уровня сервиса, запасов и трудозатрат. **Материалы и методы.** Используются системный подход к управлению организационно-производственными системами, концепции управленческих информационных систем и систем поддержки принятия решений (MIS/DSS), методы формализации требований к данным и их качеству, а также подходы к оценке качества данных (ISO/IEC 25012) и к организации управления данными (data governance). **Результаты.** Предложена модель управления торгово-производственным предприятием в виде замкнутого контура с обратной связью, в котором информационное обеспечение управления (ERP/MES/WMS/CRM, интеграция и MDM, корпоративное хранилище и витрины) и слой DSS выступают функциональным механизмом автоматизации этапов наблюдения, анализа отклонений, подготовки решения и контроля исполнения. Сформулированы измеримые требования к управленческой информации (актуальность, полнота, достоверность, согласованность, интерпретируемость, защищённость) и разработана референс-архитектура ИОУР (ERP/MES/WMS/CRM – интеграция/MDM – DWH/витрины – BI/DSS) с выделением исполнительного контура (BPM/Workflow) и механизмов мониторинга качества данных. Разработаны метрики качества данных и индикаторы результативности управления, связывающие дефекты данных с рисками управленческих решений и финансовыми потерями. Предложена решение-ориентированная методика проектирования ИОУР: декомпозиция ключевых решений, матрица «решение – данные – требования», аудит источников, построение семантического слоя KPI, внедрение регламентов data governance и оценка эффекта. Приведён прикладной кейс управления запасами и производственным планом, демонстрирующий применение модели для формирования сценариев и контроля исполнения. **Заключение.** Показано, что системное управление качеством данных и архитектурная интеграция ИОУР с DSS повышают обоснованность управленческих воздействий и позволяют количественно оценивать эффект автоматизации по снижению потерь от отсутствия товара, высвобождению оборотного капитала в запасах и сокращению трудозатрат на ручную сверку и подготовку отчётности.

Ключевые слова: управление предприятием, управленческое решение, информационное обеспечение управления, автоматизация управления, система поддержки принятия решений, корпоративные информационные системы, качество данных, data governance, торгово-производственное предприятие, цифровая трансформация

Для цитирования: Логиновский О.В., Браженко С.А. Модель и методы информационного обеспечения автоматизации процессов управления и принятия решений в торгово-производственных предприятиях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 102–114. DOI: 10.14529/ctcr260109

© Логиновский О.В., Браженко С.А., 2026

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260109

MODEL AND METHODS OF INFORMATION SUPPORT FOR AUTOMATING MANAGEMENT AND DECISION-MAKING PROCESSES IN TRADE-AND-PRODUCTION ENTERPRISES

***O.V. Loginovskiy**, loginovskiiov@susu.ru, https://orcid.org/0000-0003-3582-2795*
***S.A. Brazhenko**, bsa@uralto.ru, https://orcid.org/0009-0004-3524-9882*
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. In the context of digitalization and increasing complexity of production and sales chains in trade-and-manufacturing enterprises, management effectiveness is constrained not only by regulations and management models but also by the degree of automation in the preparation of managerial decisions and by the quality of data used within planning, procurement, production, warehouse logistics, and sales loops. Purpose of the study is to develop a model and methods of information support for the automation of management and decision-making processes that ensure a reduction of the "event – decision – action" cycle and deliver a measurable economic effect in terms of service level, inventory performance, and labor costs. **Materials and methods.** The study applies a systems approach to the management of organizational and production systems, concepts of management information systems and decision support systems (MIS/DSS), methods for formalizing data and data quality requirements, as well as approaches to data quality assessment (ISO/IEC 25012) and data governance. **Results.** A management model for a trade-and-manufacturing enterprise is proposed in the form of a closed-loop control system with feedback, in which management information support (ERP/MES/WMS/CRM, data integration and MDM, corporate data warehouse and data marts) and the DSS layer act as a functional mechanism for automating the stages of monitoring, deviation analysis, decision preparation, and execution control. Measurable requirements for management information are formulated, including timeliness, completeness, accuracy, consistency, interpretability, and security. A reference architecture of management information support (ERP/MES/WMS/CRM – integration/MDM – DWH/data marts – BI/DSS) is developed, with explicit identification of the execution layer (BPM/Workflow) and data quality monitoring mechanisms. Data quality metrics and management performance indicators are proposed, linking data defects to decision-making risks and financial losses. A decision-oriented methodology for designing management information support systems is presented, including the decomposition of key decisions, a "decision – data – requirements" matrix, source system audit, KPI semantic layer design, implementation of data governance regulations, and effect assessment. An applied case of inventory management and production planning is presented, demonstrating the use of the proposed model for scenario generation and execution control. **Conclusion.** It is shown that systematic data quality management and architectural integration of management information support with DSS increase the soundness of managerial actions and enable quantitative assessment of automation effects through the reduction of stockout losses, release of working capital tied up in inventories, and reduction of labor costs for manual reconciliation and reporting.

Keywords: enterprise management, managerial decision, management information support, management automation, decision support system, corporate information systems, data quality, data governance, trade-and-manufacturing enterprise, digital transformation

For citation: Loginovskiy O.V., Brazhenko S.A. Model and methods of information support for automating management and decision-making processes in trade-and-production enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):102–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260109

Введение

В управлении промышленным предприятием и торгово-производственным бизнесом (сочетающим производство, складскую и торговую логистику, каналы продаж и сервис) решение руководителя редко сводится к «выбору из двух вариантов». На практике управленческое решение – это управляемое изменение состояния системы: перераспределение ресурсов, изменение планов, запуск проектов, корректировка цен и ассортимента, перестройка процессов и контроль исполнения.

Рост скорости изменений, усложнение цепочек поставок, многоканальность продаж и увеличение регуляторной нагрузки приводят к тому, что управленческие решения все чаще должны опирать-

ся на данные, обрабатываемые и представляемые в цифровом контуре. Это превращает информационное обеспечение управленческих решений (ИОУР) в самостоятельный объект проектирования и управления, сопоставимый по значимости с организационной структурой и системой мотивации.

Традиционная постановка «внедрить ERP/CRM» часто не дает эффекта без целостной модели ИОУР: данные остаются несогласованными, аналитика – запаздывающей, а управленческие регламенты – формальными. Поэтому актуальной задачей становится формирование научно обоснованных подходов к построению ИОУР, учитывающих специфику торгово-производственных предприятий, требования к качеству данных и безопасности, а также интеграцию с системами поддержки принятия решений (DSS). Работы по управлению промышленными предприятиями подчеркивают необходимость целостности управленческих механизмов и прозрачности процессов, включая информационные механизмы контроля и координации [1, 2]. Классические исследования по управленческим информационным системам показывают, что тип решения и уровень управления определяют требования к информации и ИС – от операционного контроля до стратегического анализа [3].

Цель статьи – предложить практико-ориентированную модель ИОУР: сформулировать требования к управленческой информации, описать референс-архитектуру данных и аналитики, предложить методику проектирования и определить метрики, связывающие качество данных с экономическим эффектом.

1. Модель управления и теоретические основания информационного обеспечения

Торгово-производственное предприятие в рамках исследования рассматривается как сложная организационно-производственная система, эффективность управления которой определяется качеством применяемых управленческих подходов, механизмов и моделей, что соответствует направлению исследований по повышению эффективности управления организационными и производственными структурами и управлению промышленными предприятиями [1, 2]. Управление интерпретируется как замкнутый цикл, включающий наблюдение состояния объекта управления, анализ отклонений, формирование и выбор управленческих решений, реализацию управляющих воздействий и контроль исполнения.

В данной модели (см. рисунок) информационное обеспечение управления (ERP/MES/WMS/CRM, интеграция и управление мастер-данными, хранилище/витрины) и слой BI/DSS рассматриваются как функциональный элемент управленческого контура, обеспечивающий автоматизацию этапов подготовки решений и контроля исполнения и тем самым сокращающий цикл «событие – решение – действие». Реализация управленческих воздействий осуществляется через исполнительный контур предприятия (регламентированные бизнес-процессы и операционные системы), а результаты исполнения возвращаются в контур управления в виде фактических данных и отклонений, формируя обратную связь.

Для проектирования информационного обеспечения управления необходимо увязать тип управленческого решения, уровень управления и требования к информации. В классическом подходе к управленческим информационным системам решения различаются по степени структурированности (структурированные, полуструктурированные, неструктурированные), а требования к информации зависят от характера решения и уровня управления. Данная логика отражена в работах по MIS/DSS, где показано, что для менее структурированных решений требуются иные формы информационной и модельной поддержки, чем для операционного контроля [3].

Системы поддержки принятия решений (DSS) в этой связи рассматриваются как интерактивные компьютерные системы, объединяющие данные и модели для повышения качества решений в полуструктурированных задачах, дополняя традиционные отчеты и регламенты [4]. В условиях торгово-производственных предприятий такими задачами выступают, например, управление запасами и производственным планом, ценообразование и управление ассортиментом, выбор поставщиков и планирование логистики.

Качество информации в DSS и управленческой аналитике определяется не только точностью, но и другими измерениями, важными для потребителей данных. В рамках эмпирически обоснованного подхода к качеству данных выделяются группы измерений (intrinsic, contextual, representational, accessibility), что подчеркивает контекстную природу требований к данным и роль информационных систем в обеспечении доступности и интерпретируемости информации [5].

Модель управления торгово-производственным предприятием с автоматизацией процессов принятия решений
Management model of a trade-and-manufacturing enterprise with automated decision-making processes

Следовательно, обеспечение устойчивости управленческих решений требует перехода от разовых исправлений данных к управляемым процедурам управления данными. Data governance трактуется как система организационных решений и ответственности за данные, включая закрепление прав принятия решений (decision rights) по стандартам данных и качеству и механизмы подотчетности [6]. Практики управления данными и распределения ролей (владельцы доменов, стюарды, кураторы качества) систематизированы в руководствах по управлению данными (например, DAMA-DMBOK) [7].

Для постановки измеримых требований к качеству данных целесообразно использовать формализованные модели. Модель ISO/IEC 25012:2008 выделяет характеристики качества данных и рассматривает их с двух точек зрения – внутренней (inherent) и зависящей от системы (system dependent), что позволяет согласовать требования к данным для людей и информационных систем [8].

2. Информационные потребности на уровнях управления (операционный, тактический, стратегический)

Разделение уровней управления (табл. 1) позволяет выстроить ИОУР без перегрузки деталями и одновременно обеспечить управляемость системы.

Таблица 1

Уровни управления и требования к информационному обеспечению

Table 1

Management levels and information support requirements

Уровень управления	Тип решения	Ключевые показатели	Требования к данным	Инструменты (пример)
Операционный	Структурированные	Выпуск/отгрузка, остатки, брак, простои	Near real-time, высокая точность, трассируемость	MES/WMS, мониторинг, алерты

Окончание табл. 1
Table 1 (end)

Уровень управления	Тип решения	Ключевые показатели	Требования к данным	Инструменты (пример)
Тактический	Полуструктурированные	План производства, закупки, OEE, оборачиваемость	Историчность, согласованность справочников, SLA обновления	DWH, BI, сценарии
Стратегический	Неструктурированные	Маржинальность по направлениям, CAPEX, риски	Интеграция внешних и внутренних данных, объяснимость	Аналитика, имитация, баланс KPI
Кросс-функциональный	Полуструктурированные	S&OP, OTIF, cash conversion cycle	Единые определения метрик, единые источники истины	DSS, комитет по данным

Операционный уровень связан с текущим исполнением и отклонениями (смена/день), тактический – с балансировкой ресурсов и планированием (неделя/месяц), стратегический – с устойчивостью и развитием (квартал/год). Табл. 1 суммирует типовые решения и требования к информационному обеспечению.

3. Требования к управленческой информации и критерии качества данных

Требования к управленческой информации целесообразно формулировать как измеримые критерии пригодности данных для конкретного решения. Исследования по качеству данных показывают многомерность понятия «качество» и зависимость от контекста потребления данных [5, 9, 10]. В стандартизированном виде подход к моделированию качества данных закреплен в ISO/IEC 25012:2008, где определены характеристики данных, используемые при постановке требований и измерении качества [8, 11].

С учетом специфики торгово-производственных предприятий предлагается применять следующую структуру требований:

1) временные (timeliness, latency): управленческие решения по запасам, производству и логистике чувствительны к задержкам в часы и минуты;

2) содержательные (completeness, accuracy, validity): полнота обязательных атрибутов, достоверность, соответствие бизнес-правилам;

3) согласованность (consistency): единые справочники и отсутствующие противоречия между системами;

4) интерпретируемость: единые формулы KPI, возможность детализации и проверки первичных документов;

5) защищенность и соответствие: контроль доступа, аудит, соблюдение законодательства и стандартов ИБ [12–14].

Стандарты серии ISO 8000 задают общий контур управления качеством данных, включая требования к распределению ролей и ответственности [15, 16]. Тем самым качество данных становится результатом управляемого процесса, а не разовых исправлений. Работы по data governance показывают, что устойчивое качество данных достигается при наличии владельцев данных, регламентов и процедур управления изменениями [6, 17].

4. Специфика торгово-производственных предприятий как объекта ИОУР

Торгово-производственное предприятие обладает особенностями, которые усиливают требования к ИОУР: двойственная природа потоков (материальные потоки и потоки спроса/заказов), многоканальность продаж, разные горизонты планирования, высокая цена ошибок и регуляторная нагрузка.

К типовым проблемам относятся разрывы между производственным и торговым контуром, несогласованность номенклатуры и атрибутов товара, неединообразие учета маржинальности и себестоимости, а также низкая дисциплина первичного ввода. В отечественной литературе подчеркивается необходимость учета внешней и внутренней информационной среды предприятия и рассмотрение информационного обеспечения как основы проектирования управленческих систем [18].

5. Референс-архитектура ИОУР

Предлагаемая референс-архитектура включает пять взаимосвязанных уровней: 1) источники данных, 2) интеграция и подготовка, 3) хранилище и витрины, 4) аналитика и DSS, 5) управление данными и безопасность.

Уровень источников включает ERP/MES/WMS/CRM и внешние источники. На этом уровне важны валидация первичного ввода, контроль обязательности и справочники.

Интеграционный уровень реализует ETL/ELT, потоковую обработку событий при необходимости, MDM и метаданные. Практики управления данными и архитектуры данных систематизированы в DAMA-DMBOK [7].

Хранилище и витрины обеспечивают историчность, интегрированность и ориентацию на управленческие процессы. Методологии проектирования DWH и витрин представлены в работах [19, 20].

Слой аналитики включает BI, OLAP, прогнозирование, оптимизацию и имитацию. DSS обеспечивает сценарный анализ и поддержку полуструктурированных решений [4].

Сквозной уровень управления данными включает data governance, политики качества данных и меры безопасности. Для выстраивания ИТ-управления полезно использовать COBIT [21], а для управления сервисами и SLA – практики ITIL [22].

6. Организационная модель: data governance и управление изменениями

Качество данных и устойчивость аналитики не обеспечиваются без распределения ответственности. Data governance рассматривается как система правил и ролей, обеспечивающая согласованное управление данными как корпоративным активом [6, 17]. Для торгово-производственной компании рекомендуется закрепить владельцев ключевых доменов данных (товары, клиенты, поставщики, заказы, производство), а также кураторов справочников и качества.

Регламенты ИОУР должны включать каталог данных и KPI, процесс изменения показателей (версионирование), SLA на данные, процесс управления инцидентами качества данных и политики доступа. Организационно целесообразно создать рабочую группу/комитет по данным, утверждающую определения KPI и приоритеты улучшений.

7. Методы обеспечения и измерения качества данных

Качество данных должно обеспечиваться в двух контурах: на входе (в источниках) и в аналитическом контуре. В работах MIT TDQM показано, что потребители данных оценивают качество многомерно, включая своевременность и доступность, а не только точность [5].

Контроль на входе предотвращает дефекты: обязательность полей, валидация, справочники, контроль дублей и целостности. Контроль в хранилище выявляет системные проблемы: профилирование, сверка итогов, мониторинг распределений, поиск аномалий. Проверенные подходы к оценке качества данных в управленческих системах приведены в работах [9, 10].

Табл. 2 содержит примеры метрик качества данных и типовых дефектов.

Таблица 2

Показатели качества данных и управленческие эффекты

Table 2

Data quality indicators and managerial effects

Метрика	Измерение	Типовые дефекты	Риск для решений
Полнота атрибутов SKU	Заполнено/обязательно × 100 %	Пустые атрибуты (габариты, вес, категория)	Логистика, расчет доставки, планирование запасов
Дубли контрагентов	Дубли/всего × 100 %	Повторные записи клиентов/поставщиков	Кредитный контроль, маркетинг, закупки
Согласованность остатков	K_остат = 1 – |S_ERP – – S_WMS| / max(S_ERP; S_WMS)	Расхождения учета, некорректный резерв	Обещания клиенту, S&OP, продажи
Актуальность витрины продаж	Средняя задержка (мин/ч)	Запаздывание данных	Оперативное управление, промо, цены
Стабильность семантики KPI	Аудит формул и версий	Разная трактовка «выручки», «маржи»	Бюджетирование, мотивация

Для управления качеством данных рекомендуется вводить матрицу «решение – данные – требования к качеству» и использовать ее как основу приоритизации улучшений. Приоритет следует отдавать тем дефектам данных, которые создают максимальный риск для ключевых решений и финансовых показателей.

8. Интеграция ИОУР с DSS и корпоративной аналитикой

DSS ориентированы на поддержку полуструктурированных задач, объединяя данные и модели [4]. Для торгово-производственных предприятий наиболее востребованы информационные DSS (мониторинг отклонений), модельные DSS (оптимизация планов) и интеллектуальные DSS (прогнозы и аномалии).

Типология MIS/DSS связывает уровень управления и характер решения с типом информационной поддержки [3]. Следовательно, проектирование ИОУР должно начинаться с перечисления ключевых решений и определения, какие модели и данные необходимы для каждого.

Устойчивость аналитики обеспечивается архитектурой данных и семантическим слоем KPI. Методологии построения DWH и витрин данных служат технологической основой для воспроизводимых управленческих отчетов и аналитических моделей [19, 20]. Подходы к управлению предприятием в условиях цифровизации также подчеркивают важность стандартизации показателей и процессов [23, 24].

9. Безопасность и соответствие: от доверия к данным к управляемому риску

Безопасность является компонентом доверия к данным: инциденты утечки или несанкционированных изменений подрывают управленческий контур. ISO/IEC 27001 задает требования к СМИБ, включая политики, управление рисками и контроль доступа [12].

В РФ требования к информации и ее защите закреплены в 149-ФЗ [13], а обработка персональных данных – в 152-ФЗ [14]. Следовательно, в ИОУР должны быть предусмотрены: классификация данных, разграничение прав, аудит, контроль изменений справочников, резервирование и восстановление.

Для детализации наборов контролей применимы каталоги, например NIST SP 800-53 [25]. На практике контроли адаптируются к масштабу предприятия и критичности данных, а затем закрепляются в регламентах и процедурах.

10. Методика проектирования ИОУР (решение-ориентированный подход)

Проектирование ИОУР предлагается вести как цикл, ориентированный на управленческие решения и измеримый эффект. Методика включает восемь шагов.

Шаг 1. Декомпозиция решений. Определяются решения, влияющие на прибыль и риски (например, управление запасами и ценами, план производства, управление дебиторской задолженностью).

Шаг 2. Матрица данных под решения. Для каждого решения фиксируются необходимые данные и требования к качеству/обновлению, формируются SLA на данные.

Шаг 3. Профилирование и аудит источников. Выявляются дефекты (дубли, пропуски, несогласованности), оцениваются причины и масштаб.

Шаг 4. Семантический слой KPI. Создается словарь показателей и единые формулы. Оформление ссылок и списка литературы рекомендуется вести по ГОСТ Р 7.0.5-2008 [26].

Шаг 5. Архитектура интеграции и хранения. Проектируются ETL/ELT, MDM, DWH/витрины, мониторинг качества данных.

Шаг 6. Data governance. Назначаются роли, утверждаются регламенты, вводится процесс управления дефектами данных и управление изменениями [6, 17].

Шаг 7. Внедрение BI/DSS. Создаются дашборды и модели, проводится обучение пользователей.

Шаг 8. Оценка эффекта и улучшение. Вводятся метрики эффекта и корректируются решения, данные и регламенты.

11. Кейс: управление запасами и производственным планом (пример внедрения ИОУР и DSS)

Цель кейса – показать, как модель ИОУР и DSS применяется для автоматизации управленческого решения «уровни запасов – производственный план – закупки» при одновременном обес-

печении уровня сервиса и минимизации оборотного капитала. Кейс соответствует классу полуструктурированных решений: данные и часть правил формализуемы, однако требуется сценарный выбор и учет ограничений [3, 4].

Постановка управленческой задачи. Необходимо обеспечить заданный уровень сервиса по SKU при соблюдении ограничений по мощностям, материалам и срокам поставок. Управляющие воздействия включают: 1) изменение параметров пополнения (точка заказа, страховой запас); 2) формирование плана производства; 3) формирование плана закупок сырья/комплектующих; 4) перераспределение запасов между складами/точками продаж. Исполнение реализуется в операционных контурах ERP/MES/WMS.

Требуемые данные и требования к качеству. Для решения используются: продажи по каналам, остатки (физические и доступные), производственные мощности и календарь, сроки поставок, нормативы производства, себестоимость и логистические затраты. Требования к качеству и пригодности данных формализуются через измеримые характеристики качества данных, включая различение inherent и system dependent характеристик по ISO/IEC 25012 [8], а также контекстную природу требований к данным для потребителей [5].

Алгоритм поддержки решения (DSS): 1) формирование прогноза спроса на горизонте H; 2) расчет целевых уровней запасов и параметров пополнения; 3) проверка ограничений мощностей и материалов; 4) генерация альтернативных сценариев плана (производить/покупать/перемещать) и оценка по критериям; 5) выбор сценария ЛПР и формирование управляющих воздействий в ERP/MES/WMS; 6) контроль исполнения и корректировка параметров при отклонениях.

Контроль качества данных в кейсе. При расчете планов используются DQ-метрики: полнота атрибутов SKU, доля дублей контрагентов, согласованность остатков между ERP и WMS, актуальность витрин продаж, стабильность семантики KPI. Управление этими показателями выполняется в рамках процедур data governance (закрепление прав принятия решений по стандартам данных и качества, роли владельцев доменов и стюардов) [6, 7].

Расчет эффекта (методика и пример). Экономический эффект интеграции информационной системы определяется как совокупность эффектов:

– от уменьшения потерь выручки из-за отсутствия товарных позиций;

– высвобождения оборотного капитала, вложенного в товарные запасы;

– сокращения трудозатрат на ручную сверку данных и подготовку отчётности.

Обозначим:

R – годовая выручка по анализируемой группе товаров, руб.;

S_0, S_1 – доля потерь выручки из-за stockout до и после внедрения соответственно, доли единицы;

m– валовая маржа, доля единицы;

I_0, I_1 – средний объём запасов до и после внедрения, руб.;

R – стоимость капитала (норма доходности), доля единицы в год;

L – годовая экономия трудозатрат, руб./год.

Тогда компоненты экономического эффекта вычисляются по формулам:

эффект от повышения прибыльности за счёт уменьшения stockout:

$$E_{\text{прибыль}} = R \cdot (\mathrm{s}_0 - \mathrm{s}_1) \cdot m; \quad (1)$$

эффект от высвобождения оборотного капитала:

$$E_{\text{капитал}} = (I_0 - I_1) \cdot r; \quad (2)$$

совокупный экономический эффект:

$$E_{\text{итого}} = E_{\text{прибыль}} + E_{\text{капитал}} + L; \quad (3)$$

Пример расчёта. Для иллюстрации применим методику к предприятию с годовой выручкой $\boldsymbol{R = 600}$ млн руб. потери от отсутствия товара до внедрения оцениваются как $\boldsymbol{s_0 = 0,30}$ (30 % выручки), после – $\boldsymbol{s_1 = 0,15}$ (15 %) благодаря повышению точности учёта остатков и внедрению сценарного планирования.

Валовая маржа составляет $\boldsymbol{m = 0,25}$.

Средний объём запасов снижен с $\boldsymbol{I_0 = 120}$ млн руб. до $\boldsymbol{I_1 = 105}$ млн руб. Стоимость капитала $\boldsymbol{r = 0,20}$ (20 % годовых).

Экономия трудозатрат составляет $\boldsymbol{L = 12}$ млн руб./год.

Подставляя данные в формулы:

прибыльный эффект:

$$E_{\text{прибыль}} = 600 \cdot (0{,}30 - 0{,}15) \cdot 0{,}25 = 2{,}25 \text{ млн руб./год;} \quad (4)$$

эффект от высвобождения капитала:

$$E_{\text{капитал}} = (120 - 105) \cdot 0{,}20 = 3 \text{ млн руб./год;} \quad (5)$$

совокупный эффект:

$$E_{\text{итого}} \approx 2{,}25 + 3 + 12 = 17{,}25 \text{ млн руб./год.} \quad (6)$$

Значения $R, s_0, s_1, m, I_0, I_1, r, L$ в практическом проекте определяются на основе данных ERP/WMS/CRM и управленческой отчётности. Полученный эффект подтверждается сравнением показателей за сопоставимые периоды до и после внедрения информационной системы с учётом сезонных колебаний.

12. Оценка эффективности ИОУР: показатели результата и экономический эффект

Эффект от ИОУР следует оценивать на трех уровнях: 1) качество данных, 2) качество решений, 3) экономический результат.

Качество данных измеряется DQ-метриками (полнота, дубли, согласованность, актуальность). Качество решений отражается в сокращении времени принятия решений, снижении числа ручных корректировок и росте точности прогнозов. Экономический эффект проявляется в росте оборачиваемости запасов, снижении stockout и излишков, росте маржинальности и снижении потерь.

Исследования по аналитике в управлении показывают, что конкурентоспособность компаний возрастает при системном использовании данных в процессах и управленческих циклах [27]. Следовательно, проект ИОУР должен сопровождаться метриками достижения эффекта и регулярным управленческим обзором результатов.

13. Обсуждение: риски внедрения и направления развития

Риски внедрения ИОУР можно сгруппировать: семантические (разные трактовки метрик), качества данных (низкая дисциплина ввода, отсутствие владельцев), технологические (сложность интеграции), организационные (сопротивление изменениям). Для минимизации рисков полезно опираться на учебные и практические материалы по информационному обеспечению корпоративного управления [28] и на отечественные исследования по цифровизации управления [23, 24].

Перспективные направления: переход к управлению по событиям (event-driven), интеграция с моделями машинного обучения, развитие подхода «данные как продукт», повышение зрелости информационной безопасности и приватности [12, 25].

Заключение

ИОУР в торгово-производственных предприятиях является комплексной системой, объединяющей данные, технологии, роли и регламенты. Для достижения измеримого эффекта необходимы: постановка требований к управленческой информации как критериев качества данных; референс-архитектура, включающая источники, интеграцию, MDM, хранилище и DSS/BI; внедрение data governance; сквозные меры безопасности и соответствия; система метрик, связывающая качество данных с экономическим результатом. Научная новизна заключается в системной увязке требований к управленческой информации, механизмов data governance и измеримых метрик качества данных с экономическим эффектом (S&OP, сервис, оборачиваемость, потери). Практическая значимость – в предложенной архитектуре ИОУР и регламентируемом сценарии внедрения, который может быть напрямую применён в торгово-производственных предприятиях (ERP/WMS/BI/MDM, роли владельцев данных и контуры контроля качества).

Список литературы

1. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. DOI: 10.12737/1087996

2. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, В.Н. Бурков, И.В. Буркова и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. М.: Инфра-М, 2018. 410 с. ISBN 978-5-16-013606-6.

3. Gorry G.A., Scott Morton M.S. A Framework for Management Information Systems // Sloan Management Review. 1971. Vol. 13, no. 1. P. 55–70. URL: https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/47936 (дата обращения: 24.12.2025).

4. Turban E., Aronson J.E., Liang T.-P. Decision Support Systems and Intelligent Systems. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2005. 936 p. ISBN: 978-0-13-046106-3. URL: https://books.google.com/books/about/Decision_Support_Systems_and_Intelligent.html?id=NfMJAQAAMAAJ (дата обращения: 24.12.2025).

5. Wang R.Y., Strong D.M. Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers // Journal of Management Information Systems. 1996. Vol. 12, no. 4. P. 5–34. DOI: 10.1080/07421222.1996.11518099

6. Khatri V., Brown C.V. Designing Data Governance // Communications of the ACM. 2010. Vol. 53, no. 1. P. 148–152. DOI: 10.1145/1629175.1629210

7. DAMA International. DAMA® Data Management Body of Knowledge (DAMA-DMBOK®). URL: https://dama.org/learning-resources/dama-data-management-body-of-knowledge-dmbok/ (дата обращения: 24.12.2025).

8. ISO/IEC 25012:2008. Software engineering – Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Data quality model. URL: https://www.iso.org/standard/35736.html (дата обращения: 24.12.2025).

9. Wang R.Y., Storey V.C., Firth C.P. A Framework for Analysis of Data Quality Research // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 1995. Vol. 7, no. 4. P. 623–640. DOI: 10.1109/69.404034

10. Pipino L.L., Lee Y.W., Wang R.Y. Data Quality Assessment // Communications of the ACM. 2002. Vol. 45, no. 4. P. 211–218. DOI: 10.1145/505248.506010

11. ISO 9001:2015. Quality Management Systems – Requirements. URL: https://www.iso.org/standard/62085.html (дата обращения: 24.12.2025).

12. ISO/IEC 27001:2022. Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection – Information Security Management Systems – Requirements. URL: https://www.iso.org/standard/27001 (дата обращения: 24.12.2025).

13. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации». URL: https://www.kremlin.ru/acts/bank/24157 (дата обращения: 24.12.2025).

14. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных». URL: https://pravo.gov.ru/ proxy/ips/?docbody=&nd=102108261 (дата обращения: 24.12.2025).

15. ISO 8000-1:2022. Data Quality – Part 1: Overview. URL: https://www.iso.org/standard/81745.html (дата обращения: 24.12.2025).

16. ISO 8000-150:2022. Data Quality Management – Part 150: Data Quality Management Framework for Roles and Responsibilities. URL: https://www.iso.org/standard/80753.html (дата обращения: 24.12.2025).

17. Weber K., Otto B., Österle H. One Size Does Not Fit All – A Contingency Approach to Data Governance // Journal of Data and Information Quality. 2009. Vol. 1, no. 1. Art. 4. P. 1–27. DOI: 10.1145/1515693.1515696

18. Титов А.Г., Ермашкевич Н.И. Информационное обеспечение управленческих процессов // Вестник Брянского государственного университета. 2009. № 3. С. 64–74.

19. Kimball R., Ross M. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling. 3rd ed. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 601 p.

20. Inmon W.H. Building the Data Warehouse. 4th ed. Indianapolis, IN: Wiley Publishing, Inc., 2005. 576 p.

21. ISACA. COBIT. URL: https://www.isaca.org/resources/cobit (дата обращения: 24.12.2025).

22. PeopleCert. ITIL 4 Foundation. URL: https://www.peoplecert.org/browse-certifications/it-governance-and-service-management/ITIL-1/itil-4-foundation-2565 (дата обращения: 24.12.2025).

23. Горюнов И.А., Петряев М.В. Информационное обеспечение управленческой деятельности: подходы и задачи // Аллея науки. 2018. № 2 (18). С. 798–801.

24. Дедяева Л.М., Романенко В.В. Информационное обеспечение управленческой деятельности органов государственной власти // Управление стратегическим развитием основных сфер и отраслей народного хозяйства в условиях современных вызовов: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Донецк, 2–3 ноября 2022 г.). Донецк: ДонАУиГС, 2022. С. 86–91.

25. Joint Task Force. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. NIST Special Publication 800-53 Rev. 5. 2020. URL: https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/53/r5/final (дата обращения: 24.12.2025).

26. ГОСТ Р 7.0.5–2008. СИБИД. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. М.: Стандартинформ, 2008. 24 с. URL: https://diss.rsl.ru/datadocs/doc_291tu.pdf (дата обращения: 24.12.2025).

27. Davenport T.H. Competing on Analytics // Harvard Business Review. 2006. Vol. 84, no. 1. P. 98–107.

28. Исаев Д.В. Информационное обеспечение корпоративного управления и стратегического менеджмента: учеб. пособие. М.: ГУ-ВШЭ, 2008. URL: https://www.hse.ru/data/181/270/1238/ИсаевДВ%20-%20Инф%20обеспечение%20КУ%20и%20СМ.pdf (дата обращения: 24.12.2025).

References

1. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ., 2020. 450 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996. Available at: https://znanium.ru/catalog/document?id=358335 (accessed 24.12.2025).

2. Loginovskiy O.V., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Maksimov A.A., Shestakov A.L. *Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ., 2018. 410 p. (In Russ.) ISBN 978-5-16-013606-6. Available at: https://znanium.ru/catalog/document?id=399370 (accessed 24.12.2025).

3. Gorry G.A., Scott Morton M.S. A Framework for Management Information Systems. *Sloan Management Review*. 1971;13(1):55–70. Available at: https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/47936 (accessed 24.12.2025).

4. Turban E., Aronson J.E., Liang T.-P. *Decision Support Systems and Intelligent Systems*. 7th ed. Pearson/Prentice Hall, 2005. 936 p. Available at: https://books.google.com/books/about/Decision_Support_Systems_and_Intelligent.html?id=NfMJAQAAMAAJ (accessed 24.12.2025).

5. Wang R.Y., Strong D.M. Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. *Journal of Management Information Systems*. 1996;12(4):5–34. DOI: 10.1080/07421222.1996.11518099

6. Khatri V., Brown C.V. Designing Data Governance. *Communications of the ACM*. 2010;53(1):148–152. DOI: 10.1145/1629175.1629210

7. DAMA International. DAMA® Data Management Body of Knowledge (DAMA-DMBOK®). Available at: https://dama.org/learning-resources/dama-data-management-body-of-knowledge-dmbok/ (accessed 24.12.2025).

8. ISO/IEC 25012:2008. Software engineering – Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Data quality model. Available at: https://www.iso.org/standard/35736.html (accessed 24.12.2025).

9. Wang R.Y., Storey V.C., Firth C.P. A Framework for Analysis of Data Quality Research. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 1995;7(4):623–640. DOI: 10.1109/69.404034

10. Pipino L.L., Lee Y.W., Wang R.Y. Data Quality Assessment. *Communications of the ACM*. 2002;45(4):211–218. DOI: 10.1145/505248.506010

11. ISO 9001:2015. Quality Management Systems – Requirements. Available at: https://www.iso.org/standard/62085.html (accessed 24.12.2025).

12. ISO/IEC 27001:2022. Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection – Information

Security Management Systems – Requirements. Available at: https://www.iso.org/standard/27001 (accessed 24.12.2025).

13. *Federal'nyy zakon ot 27.07.2006 No. 149-FZ "Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii"* [Federal Law of July 27, 2006 No. 149-FZ "On Information, Information Technologies and Information Protection"]. (In Russ.) Available at: https://www.kremlin.ru/acts/bank/24157 (accessed 24.12.2025).

14. *Federal'nyy zakon ot 27.07.2006 No. 152-FZ "O personal'nykh dannykh"* [Federal Law of July 27, 2006 No. 152-FZ "On Personal Data"]. (In Russ.) Available at: https://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102108261 (accessed 24.12.2025).

15. ISO 8000-1:2022. Data Quality – Part 1: Overview. Available at: https://www.iso.org/standard/81745.html (accessed 24.12.2025).

16. ISO 8000-150:2022. Data Quality Management – Part 150: Data Quality Management Framework for Roles and Responsibilities. Available at: https://www.iso.org/standard/80753.html (accessed 24.12.2025).

17. Weber K., Otto B., Österle H. One Size Does Not Fit All – A Contingency Approach to Data Governance. *Journal of Data and Information Quality*. 2009;1(1):4. DOI: 10.1145/1515693.1515696

18. Titov A.G., Ermashkevich N.I. [Information Support of Management Processes]. *The Bryansk State University Herald*. 2009;(3):64–74. (In Russ.)

19. Kimball R., Ross M. *The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling*. 3rd ed. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 601 p.

20. Inmon W.H. *Building the Data Warehouse*. 4th ed. Indianapolis, IN: Wiley Publishing, Inc., 2005. 576 p.

21. ISACA. COBIT. Available at: https://www.isaca.org/resources/cobit (accessed 24.12.2025).

22. PeopleCert. ITIL 4 Foundation. Available at: https://www.peoplecert.org/browse-certifications/it-governance-and-service-management/ITIL-1/itil-4-foundation-2565 (accessed 24.12.2025).

23. Goryunov I.A., Petryaev M.V. [Information Support of Management Activity: Approaches and Tasks]. *Alleya nauki*. 2018;2(18):798–801. (In Russ.)

24. Dedyaeva L.M., Romanenko V.V. Information support of management activities of public authorities. In: *Management of strategic development of the main spheres and sectors of the national economy in the context of modern challenges: Proc. of the international scientific and practical conf. (Donetsk, November 2–3, 2022)*. Donetsk: Donetsk Academy of Management and Public Administration Publ., 2022. P. 86–91. (In Russ.)

25. Joint Task Force. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. NIST Special Publication 800-53 Rev. 5. 2020. Available at: https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/53/r5/final (accessed 24.12.2025).

26. *GOST R 7.0.5–2008*. Bibliographic Reference. General Requirements and Rules of Making. Moscow, Standartinform Publ., 2008. (In Russ.) Available at: https://diss.rsl.ru/datadocs/doc_291tu.pdf (accessed 24.12.2025).

27. Davenport T.H. Competing on Analytics. Harvard Business Review. 2006;84(1):98–107.

28. Isaev D.V. *Informatsionnoe obespechenie korporativnogo upravleniya i strategicheskogo menedzhmenta: ucheb. posobie* [Information Support of Corporate Governance and Strategic Management. Tutorial]. Moscow: State University – Higher School of Economics, 2008. (In Russ.) Available at: https://www.hse.ru/data/181/270/1238/ИсаевДВ%20-%20Инф%20обеспечение%20КУ%20и%20СМ.pdf. (accessed 24.12.2025).

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiov@susu.ru.

Браженко Сергей Александрович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bsa@uralto.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiov@susu.ru.

Sergey A. Brazhenko, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bsa@uralto.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.12.2025
The article was submitted 26.12.2025

Краткие сообщения
Brief reports

Краткое сообщение
УДК 004.896
DOI: 10.14529/ctcr260110

МЕТОДОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ИТ-КАДРОВ ДЛЯ РАБОТЫ В СРЕДЕ 1С

С.А. Богатенков[1], *sabogatenkov@fa.ru, https://orcid.org/0000-0002-0163-2937*
Я.Д. Гельруд[2], *gelrud@mail.ru*
Д.С. Богатенков[3], *bog-dim@yandex.ru*
И.А. Кетова[1], *iaketova@fa.ru*

[1] *Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Уральский филиал), Челябинск, Россия*
[2] *Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*
[3] *Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия*

Аннотация. Несмотря на значительное увеличение спроса на специалистов, работающих в среде «1С: Предприятие», система образования не всегда соответствует ожиданиям работодателей. Кадровый дефицит и несоответствие компетенций выпускников потребностям рынка являются ключевыми проблемами, что требует разработки новых подходов к подготовке кадров. **Цель исследования.** Для решения актуальной задачи обеспечения безопасности профессиональной деятельности в информационном обществе в результате управления рисками, связанными с ошибками персонала, описать оптимальные методы подготовки специалистов, работающих с программными средствами 1С, учитывающие требования работодателей. **Материалы и методы.** Проведен анализ множества вакансий сотрудников, работающих с программными средствами 1С, описаны сетевые модели персональных траекторий карьерного роста и используемые с их помощью средства машинного обучения. Автоматизация процесса формирования траекторий развития организаций реализуется с использованием сетевого графика персональных компетенций и их описаний **Результаты.** Разработана автоматизированная база данных, позволяющая формировать оптимальные персональные траектории развития ИТ-специалистов для работы на платформе «1С: Предприятие» по критериям максимального опыта работы и максимального количества сертификатов. Применение автоматизированной базы данных HR-менеджера для работы в среде 1С дает возможность снизить нагрузку на людей, задействованных в HR-менеджменте, что позволяет организовать эффективную подготовку имеющегося кадрового персонала, а также принять на работу новых сотрудников в результате минимизации кадровых рисков, связанных с подготовкой требований к работникам для их успешного карьерного роста. **Заключение.** Применение результатов исследования позволяет свести к минимуму риски, связанные с подготовкой ИТ-специалистов для работы на платформе «1С: Предприятие» и формированием вакансий для их приема на работу. Полученные результаты могут быть использованы на предприятиях, эксплуатирующих конфигурации платформы «1С: Предприятие».

Ключевые слова: подготовка ИТ-кадров, 1С: Предприятие, методы искусственного интеллекта, математические модели, персональные траектории развития

Для цитирования: Методология подготовки ИТ-кадров для работы в среде 1С / С.А. Богатенков, Я.Д. Гельруд, Д.С. Богатенков, И.А. Кетова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 115–123. DOI: 10.14529/ctcr260110

© Богатенков С.А., Гельруд Я.Д., Богатенков Д.С., Кетова И.А., 2026

Brief report
DOI: 10.14529/ctcr260110

METHODOLOGY FOR TRAINING IT STAFF TO WORK IN THE 1C ENVIRONMENT

S.A. Bogatenkov[1], *sabogatenkov@fa.ru, https://orcid.org/0000-0002-0163-2937*
Ya.D. Gelrud[2], *gelrud@mail.ru*
D.S. Bogatenkov[3], *bog-dim@yandex.ru*
I.A. Ketova[1], *iaketova@fa.ru*

[1] *Financial University under the Government of the Russian Federation (Ural Branch), Chelyabinsk, Russia*
[2] *South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*
[3] *Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*

Abstract. Despite a significant increase in demand for specialists working in the 1C: Enterprise environment, the education system does not always meet employers' expectations. The shortage of personnel and the mismatch between graduates' competencies and the market demand are key challenges that require new approaches to training. **Purpose of the study.** To address the pressing issue of ensuring professional safety in the information society by managing risks associated with human errors, we describe optimal training methods for specialists working with 1C software, taking into account employer requirements. **Materials and Methods.** A multiple analysis of vacancies for employees working with 1C software was conducted, network models of personal career paths and the machine learning tools used to support them were described. The process of generating organizational development paths is automated using a network diagram of personal competencies and their descriptions. **Results.** An automated database has been developed that enables the creation of optimal personal development paths for IT specialists working on the 1C: Enterprise platform based on criteria of maximum work experience and the maximum number of certificates. The use of an automated HR manager database for work in the 1C environment makes it possible to reduce the workload of people involved in HR management, which allows for the effective training of existing personnel, as well as the hiring of new employees by minimizing personnel risks associated with the preparation of requirements for employees for their successful career growth. **Conclusion**. The application of the research results minimizes the risks associated with the training of IT specialists working on the 1C: Enterprise platform and the creation of job vacancies for their employment. The obtained results can be use in enterprises that operate the 1C: Enterprise platform.

Keywords: IT staff training, 1C: Enterprise, artificial intelligence methods, mathematical models, personal development paths

For citation: Bogatenkov S.A., Gelrud Ya.D., Bogatenkov D.S., Ketova I.A. Methodology for training IT staff to work in the 1C environment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(1):115–123. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260110

Введение

Безопасность предприятия определяется экономической эффективностью использования собственности и степенью ее защиты от угроз [1]. Двигателем современного производства является автоматизация бизнес-процессов на основе применения информационных технологий (ИТ) и искусственного интеллекта [2]. В последнее время наблюдается тенденция роста инвестиций в ИТ, приводящая к повышению экономической эффективности бизнеса [3–6].

Тормозом современного производства является отсутствие надежного управления процессами внедрения ИТ-проектов, приводящее к большому проценту неудач. Менее 75 % проектов являются удачными, остальные были заброшены или отменены. Эффективность выполнения удачных проектов оставляет желать лучшего, так как более 50 % из них потребовало дополнительных стоимостных и временных ресурсов для своего завершения. При этом наблюдается отсутствие обещанной функциональности [7, 8].

Такое положение свидетельствует об актуальности задачи обеспечения безопасности профессиональной деятельности в информационном обществе в результате управления рисками, связанными с ошибками персонала [9].

Решение данной задачи для предприятий, использующих системы автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов (ТП), рассмотрено в работах [10, 11]. Задача

управления рисками при поиске потерь энергии с помощью автоматизированных измерительных систем и искусственного интеллекта рассмотрена в работе [12].

Эффективным инструментом для обеспечения безопасности является платформа «1С: Предприятие» (1С) [13].

Безопасное проведение кадровой политики в информационном обществе зависит от умения работодателей составлять оптимальные варианты вакансий для приема на работу новых сотрудников. Работники предприятий и организаций должны знать свои персональные траектории развития для текущей работы и продвижения по служебной лестнице [14].

В настоящее время образовательные программы обладают целым рядом недостатков [15]:

- в учебных программах основной акцент делается на изучении теории, тогда как работодатели нуждаются в работниках с практическими навыками выполнения реальных проектов;
- учебные программы зачастую не отражают современное состояние технологий в ИТ-сфере. В силу этого студенты не получают необходимые знания и навыки, необходимые для трудоустройства;
- в учебных программах не уделяется должного внимания таким инструментам, как нейронные сети, облачные вычисления, машинное обучение, которые сегодня являются стандартом в ИТ-индустрии;
- в процессе обучения не прививаются навыки командной работы, не осуществляется глубокое обучение требованиям и стандартам проектного управления, что существенно снижает возможности выпускников интегрироваться в современные ИТ-коллективы.

1. Описание предметной области

Сегодня во многих организациях используются программные средства 1С, в связи с чем организациям остро требуются квалифицированные специалисты в этой области. Для выполнения этих работ необходимо сочетание технологических и технических навыков и теоритических знаний в различных отраслях, для чего нужны соответствующим образом ориентированные программы обучения [14].

Прежде всего в этих программах должно быть предусмотрено изучение программных средств «1С: Документооборот» и, кроме того, подробно разобрано функционирование бизнес-процессов в автоматизированном режиме. Для формирования у студентов необходимых практических навыков необходимо обеспечить проведение соответствующих практических занятий, которые должны проводиться специализированными центрами, привлекая студентов к реализации совместных проектов.

Увеличение спроса на квалифицированные кадры в области 1С усиливает влияние рисков работодателей и сотрудников. Для обеспечения безопасной кадровой политики представляется целесообразным рассмотреть опыт фирмы 1С в развитии образования и 1С-сертификацию кадров [16].

Наличие сертификата 1С полезно по ряду причин.

Во-первых, подготовка к сдаче экзамена поможет сформировать необходимые компетенции для выполнения задач профессиональной деятельности в среде 1С.

Во-вторых, подтверждение компетенций может стать преимуществом при трудоустройстве.

Уровни 1С-сертификации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни 1С-сертификации

Table 1

1C Certification Levels

№	Сертификат	Компетенции, функции
1	Профессионал	Знание основных возможностей 1С-продукта
2.1	Специалист	Доработка типовых решений для задач бизнеса
2.2	Специалист-консультант	Внедрение программных решений и обучение пользователей работе в 1С-программах
3	Эксплуататор	Настройка и поддержка крупных информационных систем на базе 1С-решений, выявление проблем и их решение
4	Эксперт	Разработка и внедрение программных решений для крупных организаций

Сначала на 1-м уровне идет подготовка и получение сертификата «1С: Профессионал», после чего требуется получить сертификаты (1С: Специалист или 1С: Специалист-консультант) в зависимости от вида уже полученного сертификата (2-й уровень). Далее идет 1С: Эксплуататор (3-й уровень) и 1С: Эксперт (4-й уровень).

Работодатели должны сформулировать требования к компетенциям необходимых специалистов и обеспечить соответствующую зарплату. Для обеспечения успешного карьерного роста работникам необходимо знать классификацию соответствующих должностей при работе с 1С [14].

Данная классификация с указанием зарплаты приведена в табл. 2. Она разработана авторами по результатам анализа, проведенного в 2025 году на предприятиях Челябинской области, использующих в своей работе средства 1С. Классификация представляет интерес выпускникам вузов, претендующим на должности, и работодателям, которым она помогает определить требования к соответствующим должностям.

Таблица 2

Классификация должностей персонала в условиях применения конфигураций «1С: Предприятие»

Table 2

Classification of Personnel Positions in the Context of Using 1C:Enterprise Configurations

Технический персонал	Специалисты и инженеры	Руководители подразделений	Заместители руководителей организаций по ИТ
Должности			
Оператор 1С, специалист поддержки 1С, специалист-консультант	Консультант-аналитик 1С, аналитик-консультант 1С, программист 1С	Консультант 1С, ведущий разработчик 1С, руководитель отдела разработки 1С, программист 1С	Заместитель руководителя по 1С, ведущий программист 1С
Зарплата, тыс. руб.			
40–90	70–150	150–250	250–350
Сертификаты (и опыт работы в месяцах)			
Без сертификата (6) или 1С: Профессионал (0)	1С: Профессионал (12), 1С: Специалист или 1С: Специалист-консультант (6)	1С: Специалист, 1С: Специалист-консультант (24) или 1С: Эксплуататор (12)	1С: Эксплуататор (36) или 1С: Эксперт (24)

Ниже приведен пример требований к составу работ программиста в среде 1С «Автоматизация бизнеса».

Функции:

- настройка и доработка (при необходимости) программных средств 1С;
- обучение и консультирование работников, использующих 1С;
- обеспечение работы 1С совместно с другими программами.

В табл. 2 этой должности соответствует уровень «Специалисты и инженеры» 1С-сертификации.

Для выполнения своих должностных обязанностей при работе в среде 1С предъявляются повышенные требования к уровню квалификации персонала, он должен быть квалифицированным пользователем конфигураций «1С: Предприятие».

Для минимизации ошибок персонала мы предлагаем применять искусственный интеллект [17] и сетевую модель компетенций.

Целью исследования является разработка методологии подготовки кадров для работы в среде 1С, которая учитывает современные требования работодателей.

Для достижения цели в статье приводятся методология и результаты исследования.

Методология включает методы искусственного интеллекта и сетевую модель компетенций.

Результаты исследования реализованы на примерах синтеза оптимальных вариантов траекторий развития организаций, работающих с использованием «1С: Предприятие».

2. Методы формирования траекторий развития организаций

Автоматизация процесса формирования траекторий развития организаций реализуется с использованием сетевого графика персональных компетенций и их описаний (табл. 3).

Вершины данной сетевой модели соответствуют определенным состояниям уровней компетенций, а дуги – их логической взаимосвязей, в основе которых лежат количество сертификатов и опыт работы. Графическое представление сетевой модели приведено на рисунке.

Таблица 3

Описание состояний сетевой модели в среде «1С: Предприятие»

Table 3

Description of network model states in the 1C: Enterprise environment

Вариант	Опыт работы, мес.	Сертификаты	Компетенции, функции
1.1	6	–	Знание основных возможностей 1С-продукта
1.2	0	1С: Профессионал	
2.1	12	1С: Профессионал	Внедрение программных решений и обучение пользователей работе в 1С-программах
2.2	6	1С: Специалист или 1С: Специалист-консультант	
3.1	24	1С: Специалист или 1С: Специалист-консультант	Настройка и поддержка крупных информационных систем на базе 1С-решений, выявление проблем и их решение
3.2	12	1С: Эксплуататор	
4.1	36	1С: Эксплуататор	Разработка и внедрение программных решений для крупных организаций
4.2	24	1С: Эксперт	

Сетевой график персональных траекторий развития
Network graph of personal development trajectories

С помощью искусственного интеллекта решения находятся в пространстве состояний, т. е. в каждом случае выбирается допустимое состояние из множества возможных [17]. Для синтеза оптимальной персональной траектории развития состояние – это вершина сетевой модели возможной персональной траектории развития. При этом каждое состояние определяется двумя числами: опытом работы и количеством сертификатов (см. табл. 3). Например, первый уровень имеет два состояния 1.1 (6,0) и 1.2 (0, 1). Среди всех состояний выделяют начальное и целевое состояние. Задача заключается в том, чтобы перевести начальное состояние в целевое.

Возможно два критерия синтеза оптимальной персональной траектории развития: максимальный опыт работы и максимальное количество сертификатов. Ход – это допустимый ход в результате проверки значений вершин уровня. Например, при переходе с первого уровня на третий по критерию максимального количества сертификатов из состояния 1.2 в состояние 3.2 оптимальным вариантом будет 1.2 → 2.2 → 3.2 (см. рисунок).

В результате реализации метода определяется оптимальная персональная траектория развития по критериям – максимальный опыт работы и максимальное количество сертификатов.

Применение методологии для синтеза оптимальной персональной траектории развития позволяет минимизировать влияние рисков, связанных с ошибками персонала в результате применения методов искусственного интеллекта и сетевой модели персональных траекторий развития.

3. Реализация результатов исследования

В результате исследования авторами разработана автоматизированная база данных HR-менеджера, позволяющая формировать оптимальные персональные траектории развития при работе

на платформе «1С: Предприятие» по критериям максимального опыта работы и максимального количества сертификатов.

Рассмотрим варианты карьерного роста с уровня Технического персонала до уровня Руководителя подразделений.

Результаты работы алгоритма при переходе с 1-го на 3-й уровень по критериям максимального опыта работы и максимального количества сертификатов приведены в табл. 4.

Автоматизированная база данных представлена в виде электронной таблицы, использует табличный процессор Excel, работает под управлением операционной системы Microsoft Windows.

Таблица 4

Персональные траектории развития при переходе с 1-го на 3-й уровень для работы программными продуктами платформы «1С: Предприятие»

Table 4

Personal development paths for transitioning from Level 1 to Level 3 for working with 1C:Enterprise platform software

Критерий	Опыт работы, мес.	Сертификаты	Вариант перехода
Исходный вариант 1.1: опыт работы 6 мес.			
Максимальный опыт работы	12	1С: Профессионал	1.1 → 2.1
	24	1С: Профессионал 1С: Специалист или 1С: Специалист-консультант	2.1 → 3.1
Исходный вариант 1.2: сертификат 1С: Профессионал			
Максимальное количество сертификатов	6	1С: Профессионал 1С: Специалист или 1С: Специалист-консультант	1.2 → 2.2
	12	1С: Профессионал 1С: Специалист или 1С: Специалист-консультант 1С: Эксплуататор	2.2 → 3.2

Применение автоматизированной базы данных HR-менеджера для работы в среде 1С дает возможность снизить нагрузку на людей, задействованных в HR-менеджменте, что позволяет организовать эффективную подготовку имеющегося кадрового персонала, а также принять на работу новых сотрудников в результате минимизации кадровых рисков, связанных с подготовкой требований к работникам для их успешного карьерного роста.

Заключение

Решена задача синтеза оптимальных персональных стратегий карьерного роста при работе программными средствами «1С: Предприятие», учитывающих опыт работы и количество сертификатов. Это позволяет минимизировать влияние рисков, связанных с ошибками персонала в результате применения методов искусственного интеллекта и сетевой модели персональных траекторий развития.

В данной статье мы рассмотрели проектирование оптимальных персональных траекторий развития для работы программными продуктами платформы «1С: Предприятие». В дальнейшем в ряде своих публикаций авторы данной статьи планируют рассмотреть вопросы проектирования оптимальных персональных траекторий развития для работы с системами автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) и автоматизированными измерительными системами (АИС).

Изложенная в данной статье методика автоматизированного выбора оптимальных стратегий карьерного роста может быть успешно применена к синтезу различных систем управления сложными техническими и технологическими процессами. Например, в энергетике объектами управления являются сложные иерархические системы потоков энергии, которые рассматриваются во взаимодействии с автоматизированной измерительной системой для поиска потерь энергии [12].

Список литературы

1. Экономическая безопасность предприятия: моногр. / А.К. Моденов, Е.И. Белякова, М.П. Власов, Т.А. Лелявина. СПб.: СПбГАСУ, 2019. 550 с.

2. Что такое индустрия 4.0 и что нужно о ней знать. URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/5e740c5b9a79470c22dd13e7

3. Gartner Says Global IT Spending to Grow 1.1 Percent in 2019 // Gartner: сайт. 2019. URL: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-04-17-gartner-says-global-it-spending-to-grow-1-1-percent-i

4. Petter S., DeLone W., McLean E.R. The past, present, and future of “IS Success” // Journal of the Association for Information Systems. 2012. Vol. 13 (5). DOI: 10.17705/1jais.00296

5. Miterev M., Mancini M., Turner R. Towards a design for the project-based organization // International Journal of Project Management. 2017. Vol. 35 (3). P. 479–491. DOI: 10.1016/j.ijproman.2016.12.007

6. Turner J.R., Müller R. On the nature of the project as a temporary organization // International Journal of Project Management. 2003. Vol. 21. P. 1–8. DOI: 10.1016/S0263-7863(02)00020-0

7. Математические методы и модели управления проектами: учеб. пособие / И.В. Буркова, Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков. Челябинск: Издат. центр ЮурГУ, 2018. 193 с.

8. The Standish Group. CHAOS Report: Decision Latency Theory. Boston, USA: The Standish Group International, Inc., 2019. 64 p.

9. Богатенков С.А., Гельруд Я.Д. Проектирование системы обеспечения безопасности профессиональной деятельности в информационном обществе: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2025. 152 с. URL: https://e.lanbook.com/book/506690

10. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D. Risk management of IT projects: Automated process design systems // XVIII International scientific-technical conference on “Waters Transport Problems” (04.05.2023–05.05.2023). 2023. P. 11–14.

11. Decision-making in the conditions of introduction of automated design systems of technological processes / S.A. Bogatenkov, N.S. Sazonova, N.D. Yusubov et al. // SOCAR Proceedings. 2022. Special Issue 1. P. 6–10. DOI: 10.5510/OGP2022SI100691

12. Artificial intelligence for automated energy loss search / S. Bogatenkov, D. Bogatenkov, E. Mammadov et al. // Reliability: Theory and Applications. 2025. SI 7 (83). Vol. 20. P. 162–168. DOI: 10.24412/1932-2321-2025-783-162-168

13. Никаноров М.С., Лосев А.Н. О возможности построения информационной системы обеспечения экономической безопасности на платформе 1С // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021; Вып. 11. С. 314–318. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-11-314-319. EDN: XJTALN.

14. Богатенков С.А., Богатенков Д.С. Система информационной подготовки кадров для работы в среде 1С: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2025. 96 с. URL: https://e.lanbook.com/book/494960

15. Затонский А.В., Шаклеина П.А., Красовский Р.В. Современные методы сбора и анализа требований работодателей для подготовки ИТ-специалистов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025 Т. 25, № 1 С. 69–82. DOI: 10.14529/ctcr250106. EDN: MXZAAL.

16. Сертификация 1С: зачем проходить и как это сделать. URL: https://practicum.yandex.ru/blog/kak-proyti-sertifikaciyu-1c/.

17. Пенькова Т.Г., Вайнштейн Ю.В. Модели и методы искусственного интеллекта: учеб. пособие. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2019. 116 с. URL: https://e.lanbook.com/book/157579?category=1537.

References

1. Modenov A.K., Belyakova E.I., Vlasov M.P., Lelyavina T.A. *Ekonomicheskaya bezopasnost' predpriyatiya: monogr.* [Economic Security of an Enterprise. Monograph]. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2019. 550 p. (In Russ.)

2. *Chto takoe industriya 4.0 i chto nuzhno o ney znat'* [What is Industry 4.0 and What You Need to Know About It]. (In Russ.) Available at: https://trends.rbc.ru/trends/industry/5e740c5b9a79470c22dd13e7

3. Gartner Says Global IT Spending to Grow 1.1 Percent in 2019. *Gartner: website*. 2019. Available at: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-04-17-gartner-says-global-it-spending-to-grow-1-1-percent-i.

4. Petter S., DeLone W., McLean E.R. The past, present, and future of “IS Success”. *Journal of the Association for Information Systems*. 2012;13(5). DOI: 10.17705/1jais.00296

5. Miterev M., Mancini M., Turner R. Towards a design for the project-based organization. *International Journal of Project Management*. 2017;35(3):479–491. DOI: 10.1016/j.ijproman.2016.12.007

6. Turner J.R., Müller R. On the nature of the project as a temporary organization. *International Journal of Project Management*. 2003;21:1–8. DOI: 10.1016/S0263-7863(02)00020-0

7. Burkova I.V., Gel'rud Ya.D., Loginovskiy O.V., Shestakov A.L. *Matematicheskie metody i modeli upravleniya proektami: ucheb. posobie* [Mathematical Methods and Models of Project Management. Textbook]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2018. 193 p. (In Russ.)

8. The Standish Group. *CHAOS Report: Decision Latency Theory*. Boston, USA: The Standish Group International, Inc., 2019. 64 p.

9. Bogatenkov S.A., Gel'rud Ya.D. *Proektirovanie sistemy obespecheniya bezopasnosti professional'noy deyatel'nosti v informatsionnom obshchestve: ucheb. posobie* [Design of a system for ensuring the safety of professional activity in the information society. Textbook]. St. Petersburg: Lan', 2025. 152 p. (In Russ.) Available at: https://e.lanbook.com/book/506690.

10. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D. Risk management of IT projects: Automated process design systems. In: *XVIII International scientific-technical conference on “Waters Transport Problems” (04.05.2023–05.05.2023)*. 2023. P. 11–14.

11. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D. et al. Decision-making in the conditions of introduction of automated design systems of technological processes. *SOCAR Proceedings*. 2022;SI 1:6–10. DOI: 10.5510/OGP2022SI100691

12. Bogatenkov S., Bogatenkov D., Mammadov E. et al. Artificial intelligence for automated energy loss search. *Reliability: Theory and Applications*. 2025;SI 7(83).20:162–168. DOI: 10.24412/1932-2321-2025-783-162-168

13. Nikanorov M.S., Losev A.N. About the possibility of building an information system for ensuring economic security on the platform 1C. *Izvestiya Tul’skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya Tula State University. Technical science*. 2021;(11):314–318 (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2021-11-314-319. EDN: XJTALN.

14. Bogatenkov S.A., Bogatenkov D.S. *Sistema informatsionnoy podgotovki kadrov dlya raboty v srede 1S: ucheb. posobie* [The system of information training for working in the 1C environment. Textbook]. St. Petersburg: Lan', 2025. 96p. (In Russ.) Available at: https://e.lanbook.com/book/494960

15. Zatonskiy A.V., Shakleina P.A., Krasovskiy R.V. Modern methods of collecting and analyzing employers requirements for training IT workers. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2025;25(1):69–82. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250106. EDN: MXZAAL.

16. *Sertifikatsiya 1S: zachem prokhodit' i kak eto sdelat'* [1C Certification: Why and How to Get It]. (In Russ.) Available at: https://practicum.yandex.ru/blog/kak-proyti-sertifikaciyu-1c/.

17. Pen'kova T.G., Vaynshteyn Yu.V. *Modeli i metody iskusstvennogo intellekta: ucheb. posobie* [Models and methods of artificial intelligence. Textbook]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019. 116 p. (In Russ.) Available at: https://e.lanbook.com/book/157579?category=1537.

Информация об авторах

Богатенков Сергей Александрович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры социально-гуманитарных и естественно-научных дисциплин, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Уральский филиал), Челябинск, Россия; sabogatenkov@fa.ru.

Гельруд Яков Давидович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры международных отношений, политологии и регионоведения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gelrud@mail.ru.

Богатенков Дмитрий Сергеевич, канд. экон. наук, доц. кафедры информационных технологий и экономической информатики, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; bog-dim@yandex.ru.

Кетова Ирина Александровна, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой социально-гуманитарных и естественно-научных дисциплин, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Уральский филиал), Челябинск, Россия; iaketova@fa.ru.

Information about the authors

Sergey A. Bogatenkov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Social, Humanitarian and Natural Sciences, Financial University under the Government of the Russian Federation (Ural Branch), Chelyabinsk, Russia; sabogatenkov@fa.ru.

Yakov D. Gelrud, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of International Relations, Political Science and Regional Studies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gelrud@mail.ru.

Dmitry S. Bogatenkov, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof. of the Department of Information Technology and Economic Informatics, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia; bog-dim@yandex.ru.

Irina A. Ketova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Social, Humanitarian and Natural Sciences, Financial University under the Government of the Russian Federation (Ural Branch), Chelyabinsk, Russia; iaketova@fa.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.10.2025
The article was submitted 20.10.2025

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратурное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. **Структура статьи:**

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

• тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;

• УДК;

• название (не более 12–15 слов);

• основные сведения об авторе (авторах):

– имя, отчество, фамилия автора (полностью);

– наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;

– электронный адрес автора (e-mail);

– открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;

• аннотация (200–250 слов),

• ключевые слова (словосочетания);

• благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

• введение;

• текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

• заключение.

После основного текста статьи приводят:

• Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);

• References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

• дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;

• сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;

• даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала http://vestnik.susu.ru/ctcr.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки); 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции: 454080, г. Челябинск, ул. С. Кривой, 79, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 2.

Адрес издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
2026. Том 26, № 1

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 30.01.2026. Дата выхода в свет 10.02.2026. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Тираж 500 экз. Заказ 9/9. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.