ISSN 1998-0663

БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА

BUSINESS INFORMATICS

Т. 20 №3 — 2026



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ БАНКОВСКИХ КОНТАКТ-ЦЕНТРОВ

ВИЗУАЛЬНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ОНТОЛОГИЙ

РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ С ИИ-АГЕНТАМИ

СТРУКТУРНАЯ НАБЛЮДАЕМОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ

ISSN 1998-0663 (print), ISSN 2587-8166 (online)
English version: ISSN 2587-814X (print), ISSN 2587-8158 (online)

Т. 20 № 3 – 2026

БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА

Научный журнал НИУ ВШЭ

СОДЕРЖАНИЕ

В. В. Верхошинский
Интеллектуальная автоматизация банковских контакт-центров: ИИ-архитектура и управление эффективностью на основе данных (практика Альфа-Банка) 7

Т. А. Гаврилова
Визуальный инжиниринг онтологий и когнитивная психология 29

Ю. Н. Найденова, П. А. Паршаков, А. О. Смирнов, Е. А. Шакина, Е. А. Шенкман
Исследования ИИ-агентов в экономике и компьютерных науках: тематические направления, динамика и перспективы 47

Р. И. Мамедгулиев, О. А. Цуканова
Исследование и анализ подходов и взглядов ИТ-специалистов на системную, корпоративную и бизнес-архитектуру предприятия: тенденции, проблемы, перспективы развития 69

П. А. Михненко, М. В. Ермакова
Математическая модель и методика оценки структурной наблюдаемости системы управления знаниями: практическая апробация в АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» 90

Р. С. Рогулин
Двухэшелонная задача маршрутизации в лесопромышленной логистике с нелинейной функцией стоимости: модифицированный алгоритм муравьиной колонии на транспортном графе с транзитными вершинами 114

Издатель:
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Подписной индекс Объединенного каталога «Пресса России» – Е79128
Выпускается ежеквартально

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Главный редактор
Е.П. Зараменских

Заместитель главного редактора
Э.А. Бабкин

Компьютерная верстка
О.А. Богданович

Дизайн обложки
О.А. Богданович

Администратор веб-сайта
И.И. Хрусталева

Адрес редакции:
119049, г. Москва,
ул. Шаболовка, д. 26-28
Тел./факс: +7 (495) 772-9590 *28509
http://bijournal.hse.ru
E-mail: bijournal@hse.ru

За точность приведенных сведений и содержание данных, не подлежащих открытой публикации, несут ответственность авторы

При перепечатке ссылка на журнал «Бизнес-информатика» обязательна

Тираж:
русскоязычная версия – 100 экз.,
англоязычная версия – 100 экз.,
онлайн-версии на русском и английском – свободный доступ

Отпечатано в типографии НИУ ВШЭ
г. Москва, Измайловское шоссе, д. 44, стр. 2

© Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

О ЖУРНАЛЕ

«Бизнес-информатика» – рецензируемый междисциплинарный научный журнал, выпускаемый с 2007 года Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). Администрирование журнала осуществляется Высшей школой бизнеса НИУ ВШЭ. Журнал выпускается ежеквартально, на русском и английском языках.

Миссия журнала – развитие бизнес-информатики как новой области информационных технологий и менеджмента. Журнал осуществляет распространение последних разработок технологического и методологического характера, способствует развитию соответствующих компетенций, а также обеспечивает возможности для дискуссий в области применения современных информационно-технологических решений в бизнесе, менеджменте и экономике.

Журнал публикует статьи по следующей тематике: моделирование социальных и экономических систем, цифровая трансформация бизнеса, управление инновациями, информационные системы и цифровые технологии в бизнесе, анализ данных и системы бизнес-интеллекта, математические методы и алгоритмы бизнес-информатики, моделирование и анализ бизнес-процессов, поддержка принятия управленческих решений.

Журнал «Бизнес-информатика» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (Перечень ВАК).

Журнал входит в базы Scopus, Web of Science Emerging Sources Citation Index (WoS ESCI), Russian Science Citation Index на платформе Web of Science (RSCI), EBSCO.

Журнал распространяется как в печатном виде, так и в электронной форме.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66609 от 08.08.2016, выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Зараменских Евгений Петрович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Бабкин Эдуард Александрович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

Авдошин Сергей Михайлович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Акопов Андраник Сумбатович
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

Алескеров Фуад Тагиевич
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Афанасьев Александр Петрович
Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

Афанасьев Антон Александрович
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

Баранов Александр Павлович
Главный научно-исследовательский вычислительный центр Федеральной налоговой службы, Москва, Россия

Барахнин Владимир Борисович
Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

Беккер Йорг
Университет Мюнстера, Мюнстер, Германия

Гаврилова Татьяна Альбертовна
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Глотен Эрве
Тулонский университет, Ла-Гард, Франция

Гурвич Владимир Александрович
Ратгерский университет (Университет Нью-Джерси), Ратгерс, США

Джейкобс Лоренц
Университет Цюриха, Цюрих, Швейцария

Дискин Иосиф Евгеньевич
Всероссийский центр изучения общественного мнения, Москва, Россия

Зандкуль Курт
Университет Ростока, Росток, Германия

Иванников Александр Дмитриевич
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия

Исаев Дмитрий Валентинович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Калягин Валерий Александрович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия

Кравченко Татьяна Константиновна
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Кузнецов Сергей Олегович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Лугачев Михаил Иванович
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Лин Квей-Жей
Технологический институт Нагои, Нагоя, Япония

Мальцева Светлана Валентиновна
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Мейор Питер
Комиссия ООН по науке и технологиям, Женева, Швейцария

Миркин Борис Григорьевич
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Назаров Дмитрий Михайлович
Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Пальчунов Дмитрий Евгеньевич
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Пардалос Панайот (Панос)
Университет Флориды, Гейнсвилл, США

Пастор Оскар
Политехнический университет Валенсии, Валенсия, Испания

Посегга Йоахим
Университет Пассау, Пассау, Германия

Самуйлов Константин Евгеньевич
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Стоянова Ольга Владимировна
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, Россия

Триболе Жозе
Университет Лиссабона, Лиссабон, Португалия

Ульянов Михаил Васильевич
AVECO, Любляна, Словения

Ускенбаева Раиса Кабиевна
Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Цуканова Ольга Анатольевна
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Чхартишвили Александр Гедеванович
Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

ISSN 1998-0663 (print), ISSN 2587-8166 (online)
English version: ISSN 2587-814X (print), ISSN 2587-8158 (online)

Vol. 20 No. 3 – 2026

BUSINESS INFORMATICS

HSE Scientific Journal

CONTENTS

V. V. Verkhoshinskiy
Intelligent automation of bank contact centers: AI architecture and data-driven performance management (The case of Alfa-Bank) 7

T. A. Gavrilova
Visual ontology engineering and cognitive psychology 29

I. N. Naidenova, P. A. Parshakov, A. O. Smirnov, E. A. Shakina, E. A.Shenkman
Research on AI agents in economics and computer science: Thematic areas, dynamics, and prospects 47

R. I. Mamedguliev, O. A. Tcukanova
Research and analysis of approaches and views of IT specialists on the system, corporate and business architecture of the enterprise: trends, challenges, development prospects 69

P. A. Mikhnenko, M. V. Ermakova
Mathematical model and methodology for assessing the structural observability of a knowledge management system: A practical case study at United Engine Corporation (UEC) 90

R. S. Rogulin
A two-echelon routing problem in forest-industry logistics with a nonlinear cost function: A modified ant colony algorithm on a transport graph with transit vertices 114

Publisher:
HSE University

The journal is published quarterly

The journal is included into the list of peer reviewed scientific editions established by the Supreme Certification Commission of the Russian Federation

Editor-in-Chief
E. Zaramenskikh

Deputy Editor-in-Chief
E. Babkin

Computer making-up
O. Bogdanovich

The cover design
O. Bogdanovich

Website administration
I. Khrustaleva

Address:
26-28, build. 4, Shablovka Street, Moscow 119049, Russia

Tel./fax: +7 (495) 772-9590 *28509
http://bijournal.hse.ru
E-mail: bijournal@hse.ru

Circulation:
English version – 100 copies,
Russian version – 100 copies,
online versions in English and Russian – open access

Printed in HSE Printing House
44, build. 2, Izmaylovskoye Shosse, Moscow, Russia

© HSE University

ABOUT THE JOURNAL

Business Informatics is a peer reviewed interdisciplinary academic journal published since 2007 by HSE University, Moscow, Russian Federation. The journal is administered by HSE Graduate School of Business. The journal is issued quarterly, in English and Russian.

The mission of the journal is to develop business informatics as a new field within both information technologies and management. It provides dissemination of latest technical and methodological developments, promotes new competences and provides a framework for discussion in the field of application of modern IT solutions in business, management and economics.

The journal publishes papers in the following areas: modeling of social and economic systems, digital transformation of business, innovation management, information systems and technologies in business, data analysis and business intelligence systems, mathematical methods and algorithms of business informatics, business processes modeling and analysis, decision support in management.

The journal is included into the list of peer reviewed scientific editions established by the Supreme Certification Commission of the Russian Federation.

The journal is included into Scopus, Web of Science Emerging Sources Citation Index (WoS ESCI), Russian Science Citation Index on the Web of Science platform (RSCI), EBSCO.

The journal is distributed both in printed and electronic forms.

Certificate of registration of mass media ПИ № ФС 77-66609 dated 08.08.2016, registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications.

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

Evgeny P. Zaramenskikh
HSE University, Moscow, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Eduard A. Babkin
HSE University, Nizhny Novgorod, Russia

EDITORIAL BOARD

Sergey M. Avdoshin
HSE University, Moscow, Russia

Andranik S. Akopov
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Fuad T. Aleskerov
HSE University, Moscow, Russia

Alexander P. Afanasyev
Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Anton A. Afanasyev
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Vladimir B. Barakhnin
Federal Research Center of Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia

Alexander P. Baranov
Federal Tax Service, Moscow, Russia

Jörg Becker
University of Munster, Munster, Germany

Alexander G. Chkhartishvili
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Tatiana A. Gavrilova
Saint-Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Hervé Glotin
University of Toulon, La Garde, France

Vladimir A. Gurvich
Rutgers, The State University of New Jersey, Rutgers, USA

Laurence Jacobs
University of Zurich, Zurich, Switzerland

Iosif E. Diskin
Russian Public Opinion Research Center, Moscow, Russia

Dmitry V. Isaev
HSE University, Moscow, Russia

Alexander D. Ivannikov
Institute for Design Problems in Microelectronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Valery A. Kalyagin
HSE University, Nizhny Novgorod, Russia

Tatiana K. Kravchenko
HSE University, Moscow, Russia

Sergei O. Kuznetsov
HSE University, Moscow, Russia

Kwei-Jay Lin
Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan

Mikhail I. Lugachev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Svetlana V. Maltseva
HSE University, Moscow, Russia

Peter Major
UN Commission on Science and Technology for Development, Geneva, Switzerland

Boris G. Mirkin
HSE University, Moscow, Russia

Dmitry M. Nazarov
Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

Dmitry E. Palchunov
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Panagote (Panos) M. Pardalos
University of Florida, Gainesville, USA

Óscar Pastor
Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain

Joachim Posegga
University of Passau, Passau, Germany

Konstantin E. Samouylov
Peoples' Friendship University, Moscow, Russia

Kurt Sandkuhl
University of Rostock, Rostock, Germany

Olga Stoyanova
HSE University, St. Petersburg, Russia

José M. Tribolet
Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

Olga A. Tsukanova
Saint-Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Mikhail V. Ulyanov
AVECO, Ljubljana, Slovenia

Raissa K. Uskenbayeva
Kazakh National Technical University after K.I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan

DOI: 10.17323/2587-814X.2026.3.7.28

Интеллектуальная автоматизация банковских контакт-центров: ИИ-архитектура и управление эффективностью на основе данных (практика Альфа-Банка)

Владимир Вячеславович Верхошинский
Email: vvverkhoshinskiy@mail.ru

АО «Альфа-банк», Москва, Россия

Аннотация

Масштабирование технологий искусственного интеллекта (ИИ) в банковских контакт-центрах меняет подход к обслуживанию клиентов и механизмы управления операционной эффективностью. Вместе с тем остается недостаточно изученным вопрос о том, как архитектура ИИ, управление данными и система показателей совместно преобразуют технологические возможности в устойчивые результаты при соблюдении требований информационного и технологического суверенитета. Цель исследования – выявить условия результативной интеллектуальной автоматизации банковского контакт-центра и оценить динамику ключевых операционных показателей банка. Проведено поисковое исследование практики Альфа-Банка, дополненное вторичным количественным анализом. Эмпирическую основу составили временные ряды ключевых показателей эффективности (KPI) за 2023–2026 годы, документация по внедрению ИИ, материалы конкурентного бенчмаркинга, корпоративные и открытые источники. Применены триангуляция данных, картирование архитектуры, анализ тенденций и трассировка процессов. Теоретическую основу образуют ресурсный подход, теория динамических способностей и концепция организации, управляемой данными. Выявлена пятиуровневая модель технологической платформы, объединяющая клиентские диалоговые системы, интеллектуальную поддержку операторов, управление корпоративными знаниями, автоматизированный контроль качества и персонализированное обучение. Генеративный ИИ расширяет функционал каждого уровня, обеспечивая переход от фрагментарной автоматизации к интегрированной, контекстно-зависимой и управляемой данными ИИ-среде. Эффективность внедрения ИИ определяется системой управления, одновременно контролирующей автоматизацию и удовлетворенность клиентов. В 2024 году недостаточная зрелость технологий обусловила

снижение целевого уровня автоматизации с 52% до 43% для сохранения качества сервиса, что при росте обращений увеличило потребность в персонале и стоимость обслуживания активного клиента. В 2025 году системное управление данными и внедрение генеративного ИИ позволили повысить автоматизацию до 56% при сохранении качества. Научный вклад состоит в концептуализации ИИ как инфраструктуры организационного обучения и управления. Показано, что архитектура KPI с двойным ограничением и институционализированный конкурентный бенчмаркинг представляют собой организационные возможности, преобразующие технологические инновации в измеримые сервисные и экономические результаты.

Ключевые слова: искусственный интеллект, интеллектуальная автоматизация, банковские контакт-центры, большие языковые модели, управление на основе данных, ключевые показатели эффективности, взаимодействие человека и искусственного интеллекта

Цитирование: Верхошинский В. В. Интеллектуальная автоматизация банковских контакт-центров: ИИ-архитектура и управление эффективностью на основе данных (практика Альфа-Банка) // Бизнес-информатика. 2026. Т. 20. № 3. С. 7–28. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.7.28

Введение

Глобальный сектор финансовых услуг переживает фундаментальную трансформацию, обусловленную конвергенцией искусственного интеллекта, больших языковых моделей (LLM) и передовых систем управления данными – сдвиг, который переопределяет не только технологическую инфраструктуру банков, но и их организационную логику, операции по обслуживанию клиентов и парадигмы измерения эффективности [1]. В эпицентре этого перехода находятся банковские контакт-центры, исторически характеризующиеся высокой трудоемкостью и переменным качеством обслуживания: глобальный рынок ИИ в банковской сфере, оцениваемый примерно в 17,8 млрд долларов США в 2026 году, по прогнозам, достигнет 64,3 млрд долларов США к 2030 году (среднегодовой темп роста 20,5%), в то время как объем российского рынка технологий искусственного интеллекта (ИИ) по итогам 2025 года мог составить около 1,9 трлн рублей при темпе роста 25–30%. Высокую интенсивность внедрения ИИ в финансовом секторе РФ также подтверждают данные исследований, согласно которым 95% опрошенных компаний финансового рынка сообщают о внедрении ИИ в основные процессы[1]. Для крупного универсального банка, обслуживающего десятки миллионов клиентов физических и юридических лиц, контакт-центр является критически важным каналом взаимодействия с клиентами и обрабатывает более ста миллионов взаимодействий в год – от простого информирования до разрешения споров и сложных ситуаций. Качество, скорость и стоимость обслуживания в этом канале измеряются с помощью структурированного набора ключевых показателей эффективности (KPI): коэффициент автоматизации (AUT%), показатели обратной связи клиентов (VoC), среднее время обработки обращения (AHT), доля вопросов, решенных на первом контакте (FCR) и пр. [2]. Систематическое улучшение указанных показателей требует не только внедрения инструментов на основе ИИ, но и формирования организационно-технологической архитектуры, обеспечивающей сбор, обработку и использование операционных данных в режиме, близком к реальному времени. В связи с этим одной из ключевых задач банковской трансформации становится разработка и эмпирическая проверка модели, в которой ИИ-архитектура, опе-

[1] Generative AI In BFSI Market Report 2026. https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/ai-in-bfsi-global-market-report

рационные процессы и система ключевых показателей эффективности интегрированы в единый контур управления, основанный на данных.

Альфа-Банк, крупнейший частный коммерческий банк России, представляет собой успешный эмпирический пример масштабной трансформации контакт-центров с помощью ИИ. Развитие технологической инфраструктуры контакт-центра сопровождалось замещением зарубежных программных компонентов отечественными решениями и внедрением генеративного ИИ. Собственная платформа AlfaGen обеспечивает работу с несколькими десятками LLM, включая GigaChat и YandexGPT. Использование RAG-механизма позволяет модели обращаться к защищенным корпоративным источникам для формирования контекстно релевантных ответов. Это повышает точность и актуальность консультаций, снижает риск недостоверных ответов и обеспечивает соблюдение требований кибербезопасности. В марте 2025 года Альфа-Банк был удостоен премии «Лучшее глобальное использование ИИ в FinTech» на выставке Fintech India Expo 2025[2], став первым российским учреждением, получившим это признание. Впоследствии банк получил награду Fortune Times «Лидер в решениях FinTech» за свою устойчивую стратегию инноваций в области ИИ[3], включая первое развертывание модели логического мышления DeepSeek R1 в России, завершенное в течение нескольких часов после ее международного запуска. Эти награды отражают не только технические достижения, но и организационную компетентность в преобразовании инвестиций в ИИ в поддающиеся проверке операционные результаты.

Значимость исследования этого кейса выходит далеко за рамки одного банка. Российский банковский сектор функционирует в условиях, отличающих его от западных финансовых рынков: прогрессивное регулирование использования ИИ со стороны Банка России, концентрированная олигополистическая структура рынка, высокий уровень проникновения цифрового банкинга и ускоряющаяся гонка между крупными банками за монетизацию инфраструктуры ИИ. Эти условия создают естественную лабораторию для наблюдения за тем, как происходит внедрение ИИ в контексте одновременного развития регулирования и усиления конкуренции [3]. В то же время, специфическая динамика российского банковского сектора – включая акцент на суверенитете данных, использование разработанных внутри страны моделей LLM и нормативно-правовую базу, разработанную Банком России – представляют собой уникальные контекстуальные переменные, которые еще не были должным образом рассмотрены в международной литературе.

Аспект управления данными еще больше усиливает научную значимость этого исследования. Переход от внедрения ИИ к управлению на основе данных не происходит автоматически: он требует целенаправленного создания инфраструктуры измерения, стандартизации определений KPI, создания конвейеров данных из множества операционных систем и институционализации принятия решений на основе фактических данных на управленческом уровне. Организации, успешно прошедшие этот переход, демонстрируют то, что ученые все чаще называют «ориентацией на данные» [4] – стратегическую позицию, при которой данные рассматриваются как основной организационный актив, а не просто побочный продукт информационных технологий. Задача внедрения такой ориентации в крупном, сложном финансовом учреждении при одновременном масштабировании инструментов ИИ в работе контакт-центров представляет собой одну из определяющих управленческих проблем современной эпохи цифровизации банковского дела.

Цель данного исследования – анализ интеллектуальной автоматизации, влияющей на архитектуру, управление и операционные результаты интеграции ИИ в работу контакт-центров банков, используя в качестве основного эмпирического примера Альфа-Банк – одного из лидеров отрасли по внедрению ИИ среди российских банков. В частности, исследование направлено на: (1) описание и анализ многоуровневой архитектуры ИИ, раз-

[2] Журналисты делового журнала Fintech Watch отметили Альфа-Банк в сфере ИИ. https://companies.rbc.ru/news/Q4w4jldSmY/zhurnalistyi-delovogo-zhurnala-fintech-watch-otmetili-alfa-bank-v-sfere-ii/

[3] ИИ без границ: как Альфа-Банк сделал его инструментом каждого сотрудника. https://www.forbes.ru/brandvoice/547169-ii-bez-granic-kak-al-fa-bank-sdelal-ego-instrumentom-kazdogo-sotrudnika

вернутой в контакт-центре Альфа-Банка, включая роль автоматизации на основе LLM, совместного производства человеком и ИИ, а также инструментов генеративного ИИ; (2) выявление принципов управления данными и механизмов управления KPI, обеспечивающих систематическое измерение производительности в режиме реального времени в среде обслуживания, дополненной ИИ; (3) оценку операционных результатов интеграции ИИ с помощью структурированного набора метрик контакт-центра, делая выводы, имеющие отношение как к управленческой практике, так и к теоретическому развитию.

Исследование руководствуется следующими исследовательскими вопросами:

RQ1. Какие архитектурные принципы характеризуют масштабируемую, суверенную по данным интеграцию ИИ в крупном контакт-центре розничного банковского обслуживания, и чем эти принципы отличаются от тех, которые описаны в существующей литературе?

RQ2. Как управление KPI на основе данных обеспечивает систематическое повышение производительности в контакт-центре, дополненном ИИ, и какие организационные условия необходимы для функционирования этого механизма?

RQ3. Каковы измеримые операционные результаты – с точки зрения уровня автоматизации, качества обслуживания, экономической эффективности и распределения рабочей нагрузки между человеком и ИИ – связанные с расширенной интеграцией ИИ в контакт-центре Альфа-Банка?

Центральная гипотеза исследования заключается в том, что повышение операционной эффективности, связанное с внедрением ИИ в банковских контакт-центрах, не является прямой функцией технологической сложности ИИ как таковой, а опосредовано качеством инфраструктуры управления данными и институционализацией управления KPI на основе данных – в соответствии с теоретическими предсказаниями парадигмы организации, управляемой данными, и концепции динамических способностей. Эта гипотеза обосновывает разработку тематического исследования, которое учитывает не только технологические артефакты, но и организационные процессы и процессы управления данными, посредством которых возможности ИИ преобразуются в измеримые улучшения обслуживания.

1. Теоретическая рамка исследования: основные подходы к интеллектуальной автоматизации бизнес-процессов

1.1. Ресурсная концепция и теория динамических способностей

Ресурсная концепция (The Resource-Based View (RBV)) впервые сформулированная в работе [5], утверждает, что устойчивое конкурентное преимущество проистекает из обладания фирмой ценными, редкими, неповторимыми и незаменимыми ресурсами (концепция VRIN). Применительно к сфере ИИ в банковском секторе, RBV рассматривает собственную инфраструктуру ИИ – включая внутренние большие языковые модели (LLM), специально обученные базы знаний, нейронные сети автоматической классификации и вертикально интегрированные конвейеры обработки данных – как стратегические активы, которые конкуренты не могут легко воспроизвести. Данные межстрановых панельных исследований банковского сектора подтверждают, что инновации в области технологий ИИ, рассматриваемые как стратегический ресурс VRIN, положительно и значительно влияют на рентабельность активов банков, подчеркивая их роль в создании устойчивого конкурентного преимущества [6]. Аналогично, индексы внедрения ИИ, построенные на основе заявок на патенты, интенсивности НИОКР и масштабов внедрения в более чем 20 странах, демонстрируют, что учреждения, систематически инвестирующие в инфраструктуру ИИ, достигают измеримо более высоких финансовых результатов по сравнению с отстающими [7].

Теория динамических способностей (Dynamic Capabilities Theory, DCT), расширяющая ресурсную концепцию, подчеркивает, что фирмы должны постоянно отслеживать рыночные возможности, использовать их посредством инвестиционных решений и перестраивать свою базу активов в ответ на изменения окружающей среды [8]. Эта логика перестройки непосредственно наблюдается в эволюционной траектории ведущих российских банков, которые прошли путь от автоматизации на основе правил (2019–2021 гг.) через разговорный ИИ и классификацию на основе НЛП (2021–2023 гг.) к помощникам на основе LLM и автономным агентам ИИ (2024–2026 гг.). Концепция «умной трансформации» – определяемая как интеграция ИИ для создания автоном-

ных, контекстно-ориентированных и самосовершенствующихся решений, которые способствуют обновлению бизнес-модели – точно отражает этот переход от статической цифровой трансформации к принципиально иной парадигме адаптивной, встроенной в ИИ операционной логики [9]. «Умная трансформация» – это не разовое вложение, а непрерывный, рекурсивный процесс переконфигурации, экспериментирования и расширения возможностей ИИ в рамках организационной экосистемы. В контексте платформы AlfaGen Альфа-Банка, дающей возможность разворачивать LLM на внутренних серверах, этот подход DCT показывает, как суверенная инфраструктура ИИ представляет собой редкую и трудноимитируемую возможность, которая напрямую приводит к измеримому повышению производительности контакт-центра.

1.2. Модель принятия технологий – перспектива внутреннего внедрения

Хотя модель принятия технологий (TAM), первоначально предложенная в работе Дэвиса [10], чаще всего применяется к внедрению технологий внешними клиентами, она предоставляет столь же обоснованную аналитическую основу для понимания принятия сотрудниками инструментов ИИ – фактора, имеющего решающее значение для достижения повышения операционной эффективности в масштабах. Модель TAM предполагает, что принятие пользователями технологий в первую очередь определяется двумя перцептивными конструктами: воспринимаемой полезностью (PU) – убеждением, что инструмент повысит производительность труда, и воспринимаемой простотой использования (PEOU) – убеждением, что инструментом можно пользоваться без чрезмерных когнитивных усилий [11]. В банковском секторе многочисленные эмпирические исследования подтверждают, что воспринимаемая полезность и простота использования существенно влияют на удовлетворенность персонала системами на основе ИИ, а воспринимаемое доверие модерирует взаимосвязь между поведенческим намерением и фактическим использованием [12].

Интегрированная модель TAM–Перспектива внутреннего внедрения (Technology Readiness, TR), проверенная на выборке из 464 банковских специалистов в Индии, показала, что инновационность, оптимизм, персонализация и интерактивность положительно влияют как на воспринимаемую простоту использования, так и на воспринимаемую полезность, которые, в свою очередь, предсказывают намерение внедрения. Анализ PLS-SEM подтвердил коэффициенты пути 0,816 (PEE → Намерение) и 0,716 (PEL → Намерение), устанавливая опосредующую роль конструктов TAM между измерениями готовности к технологиям и фактическим поведением внедрения. В контексте крупномасштабного корпоративного внедрения ИИ – например, внедрения внутреннего ИИ-помощника для более чем 10000 сотрудников в течение двух недель – эти конструкции TAM проявляются как наблюдаемые индикаторы: уровень удовлетворенности сотрудников ответами базы знаний, генерируемой ИИ, служит мерой воспринимаемой полезности, в то время как скорость внедрения в бизнес-подразделениях отражает воспринимаемую простоту использования [13].

Совсем недавно интегрированная структура TOE–TAM (Технология–Организация–Окружающая среда / Модель принятия технологий) была применена к внедрению ИИ в банковской сфере [14], показав, что организационные факторы – в частности, готовность банковской инфраструктуры (β = 0,406) и потенциал финансовых инвестиций (β = 0,387) – оказывают существенно большее влияние на внедрение, чем индивидуальные воспринимаемые конструкции. Этот вывод предполагает, что при ресурсоемком внедрении ИИ в масштабах предприятия институциональный потенциал и структурная готовность являются основными детерминантами успеха внедрения, в то время как конструкции TAM – хотя и статистически значимые – функционируют как условия, способствующие внедрению, а не как доминирующие факторы. Для внутренней платформы ИИ Альфа-Банка это означает, что суверенная инфраструктура банка представляет собой как ресурс VRIN [15], определенный в рамках ресурсной теории фирмы, так и переменную организационной инфраструктуры, которую TOE–TAM определяет как ведущий фактор внедрения.

1.3. Теория организации, основанной на данных

Концепция организации, ориентированной на данные (The Concept of the Data-Driven Organisation, DDO), предполагает, что устойчивое повышение

эффективности требует не просто сбора данных, но и построения архитектуры управления, в которой сначала определяются ключевые показатели эффективности (KPI), затем выявляются источники данных, а на третьем этапе назначается ответственный за метрики [16, 17]. Эта логика управления, ориентированная на KPI, резко контрастирует с традиционными подходами, ориентированными на данные, где системы отчетности строятся на основе имеющихся данных, а не на том, на какие вопросы, касающиеся эффективности, действительно необходимо ответить. В управлении контакт-центром это выражается в систематическом отслеживании таких показателей, как коэффициент автоматизации (AUT%), индекс «Голос клиента» (VoC), удельная стоимость активного клиентского счета и производительность операторов – все это составляет измеримое ядро организации, предоставляющей услуги, ориентированные на данные.

Основанные на KPI системы бизнес-аналитики (Business Intelligence, BI), использующие такие инструменты, как сбалансированная система показателей (Balanced Scorecard), методология Performance Prism и SMART, обеспечивают систематические подходы к выбору, проектированию и классификации показателей эффективности таким образом, чтобы обеспечить согласованность между операционными процессами и стратегическими целями [18]. Исследования технологий контакт-центров показали, что оценка эффективности их внедрения строится на комплексной системе ключевых показателей эффективности (KPI), которая включает такие параметры как уровень обслуживания, среднее время обработки обращения (AHT), стоимость контакта, доля вопросов, решенных на первом контакте, удовлетворенность клиентов и коэффициент загрузки операторов (Occupancy rate). Важно отметить, что в литературе различают стратегические KPI, ориентированные на долгосрочное конкурентное позиционирование и финансовое состояние, и операционные KPI, отслеживающие краткосрочную производительность процессов [19]. Эффективные архитектуры бизнес-аналитики требуют иерархических связей между этими двумя уровнями, чтобы измеримые улучшения на операционном уровне можно было отследить до прогресса в достижении стратегических организационных целей [2].

Pigamov & Kitova, анализируя практику цифровой трансформации ведущих российских банков, включая Альфа-Банк, Сбербанк, ВТБ и Т-Банк, подтверждают, что внедрение ИИ и аналитики больших данных может повысить точность оценки кредитного риска до 95% и сократить время обработки запросов клиентов на 30% в контакт-центрах – результаты, достижимые только при институционализации измерения эффективности, а не при его разрозненном характере [20]. Эти данные из российского сектора подчеркивают важность системы управления данными, которая делает отслеживание KPI систематическим, воспроизводимым и контролируемым на уровне организации, а не зависящим от индивидуальной инициативы. По мнению Главного управляющего директора Альфа-Банка, использование ИИ исключительно как инструмента сокращения персонала способно дать лишь краткосрочный экономический эффект. Подход банка основан на иной логике: генеративный ИИ рассматривается прежде всего как средство усиления сотрудников, освобождения их от рутинных операций и повышения качества решений в сложных клиентских ситуациях. Поэтому Альфа-Банк развивает комплекс сервисов на базе ИИ для повышения одновременно доступности и качества клиентской поддержки, а также производительности, профессионального развития и расширения возможностей сотрудников. «Мы это называем «цифровой экзоскелет». По факту это большой набор помощников, которые позволяют понимать эмоции клиента, лучше и быстрее реагировать на его вопросы. В долгосрочной перспективе это дополнение к реально качественному обслуживанию и заботе о клиентах – только это дает результат»[4].

2. Парадигма использования искусственного интеллекта в рамках интеллектуальной автоматизации колл-центров

2.1. Теория сотрудничества человек–ИИ

Парадигма расширения – в отличие от парадигмы замещения – рассматривает ИИ не как замену работников-людей, а как расширение их когнитивных и операционных возможностей [21]. Систематические данные о внедрении ИИ в сфере финансовых

[4] Владимир Верхошинский рассказал о применении ИИ в клиентских сервисах (2024). РБК. https://www.rbc.ru/industries/news/67409e2e9a79475c6c6c3f83

услуг подтверждают, что автоматизация с использованием ИИ освобождает операторов-людей от рутинных, повторяющихся задач и перераспределяет их внимание на более ценные, сложные взаимодействия, требующие рассудительности, эмпатии и этического мышления [22]. В банковских контакт-центрах было показано, что чат-боты на основе ИИ и помощники на основе НЛП сокращают объем работы контакт-центра на 30–35% и снижают средние затраты на обслуживание одного взаимодействия, одновременно позволяя операторам-людям сосредоточиться на сложных клиентских случаях, требующих построения отношений, что способствует удержанию клиентов и перекрестным продажам [23]. Это перераспределение когнитивных ресурсов человека является именно тем механизмом, посредством которого парадигма расширения обеспечивает повышение производительности, которого не удалось бы достичь при чистой стратегии замещения – полном исключении операторов-людей [24].

Эмпирические исследования внедрения LLM в рабочие процессы показывают, что операторы, использующие инструменты ИИ, адаптируют свои модели общения, становясь более эффективными и ориентированными на клиента, что приводит к более структурированному и целенаправленному взаимодействию. Исследование прототипирования LLM в техническом обслуживании клиентов [25] показало, что когнитивные задачи нижнего уровня – перевод, суммирование, генерация контента, классификация намерений – могут быть эффективно автоматизированы, в то время как задачи рассуждения более высокого уровня требуют сложных архитектур, таких как генерация, дополненная поиском (RAG), или моделей, дообученных для предметной области. Этот вывод напрямую соответствует пятиуровневой модели участия ИИ, наблюдаемой в архитектуре контакт-центра Альфа-Банка, которая варьируется от полностью автоматизированных скриптовых ответов на базовом уровне до агентов ИИ, работающих с частичной автономией на более высоких уровнях, при этом человеческий контроль сохраняется для сложных путей эскалации[5].

Исследования о сотрудничестве человека и ИИ также подчеркивает риск деквалификации – постепенного снижения независимого суждения и экспертных знаний сотрудников, когда чрезмерная зависимость от систем ИИ заменяет, а не дополняет принятие решений человеком [26]. Для работающего в масштабе контакт-центра, ориентированного на данные, управление этим риском требует продуманной системы управления: ИИ должен использоваться как инструмент, расширяющий возможности человека, а не как его замена, сохраняя способность операторов обрабатывать нестандартные ситуации, управлять эмоционально сложными взаимодействиями и поддерживать качество отношений, лежащее в основе доверия клиентов к финансовым услугам. В свою очередь, исследования в области алгоритмического управления [27, 28] показывают, что когда системам ИИ не хватает прозрачности, работники испытывают снижение автономии и психологической безопасности, что может ухудшить качество обслуживания и увеличить текучесть кадров. Это соображение подчеркивает важность объяснимого проектирования ИИ в банковских операциях.

2.2. Теория внедрения чат-ботов в колл-центры в банковском секторе

Исследования внедрения чат-ботов на базе ИИ в банковском секторе выявили устойчивый набор параметров качества обслуживания, посредством которых автоматизированные диалоговые агенты влияют на удовлетворенность клиентов и операционную эффективность: время ответа, доступность, эффективность и удовлетворенность клиентов – последний критерий является наиболее часто: он встречается в 29,6% исследований, включенных в систематические обзоры, за ним следует эффективность. Комплексный систематический обзор 61 публикации о чат-ботах в финансовых услугах [24] подтверждает, что удовлетворенность клиентов и эффективность являются не просто желательными характеристиками, а центральной системой измерения, с помощью которой оценивается ценность чат-ботов в банковском контексте. Количественно, внедрение чат-ботов в финансовых учреждениях приводит к сокращению времени ответа на 35–50% и повышению удовлетворенности клиентов на 15–25%, что обеспечивает подтвержденную эмпирическую базу, на основе которой можно сравнивать данные тематических исследований отдельных банков.

[5] Внутренние данные компании

Помимо показателей эффективности, в литературе [29, 30] доверие определяется как критически важная переменная, влияющая на внедрение чат-ботов. В исследовании, сочетающем количественные данные опроса 400 клиентов банков и качественные интервью с 20 банковскими специалистами, было установлено, что скорость отклика чат-бота, круглосуточная доступность и персонализация существенно влияют на удовлетворенность клиентов: более 72% пользователей сообщили о положительном опыте, когда обслуживание было быстрым и доступным. Для банковских учреждений, внедряющих гибридные модели поддержки – сохраняя операторов-людей для сложных запросов и используя ИИ для рутинных взаимодействий – уровень доверия и удовлетворенности клиентов заметно выше, что подтверждает парадигму расширения.

Концепция UTAUT (Единая теория принятия и использования технологий) [31], применяемая к внедрению чат-ботов в банковской сфере, подтверждает, что ожидаемая производительность и ожидаемые усилия являются наиболее сильными индивидуальными предикторами внедрения чат-ботов, в то время как социальное влияние, условия содействия и демографические переменные (возраст, пол, предыдущий опыт) выступают в качестве модераторов. Важно отметить, что специалисты отрасли, опрошенные в исследованиях на основе UTAUT, определяют шестиэтапную траекторию развития чат-ботов – от базовой обработки часто задаваемых вопросов, через персонализированные оповещения и безопасную обработку транзакций, до полной интеграции в экосистему – которая напрямую соответствует многоуровневой архитектуре ИИ, задокументированной в ведущих российских банках.

2.3. ИИ в финансовом секторе: классификация технологий и эксплуатационные преимущества

Современный ИИ в финансовом секторе включает в себя набор взаимосвязанных классов технологий, каждый из которых вносит свой вклад в банковские операции: контролируемое машинное обучение (оценка кредитоспособности, обнаружение мошенничества), неконтролируемое обучение (сегментация клиентов, обнаружение аномалий), обучение с подкреплением (динамическое ценообразование, исполнение сделок), обработка естественного языка (автоматизация обслуживания клиентов, мониторинг соответствия требованиям), роботизированная автоматизация процессов (RPA; автоматизация рабочих процессов бэк-офиса) и большие языковые модели (разговорные агенты, обобщение документов, генерация баз знаний) [32]. В частности, в работе контакт-центров классификация намерений на основе обработки естественного языка и генерация ответов на основе больших языковых моделей решают основные проблемы обработки больших объемов разнородных запросов клиентов быстро и согласованно.

Эмпирические данные из финансового сектора показывают, что внедрение ИИ снижает операционные издержки по нескольким направлениям: снижение трудозатрат на обработку рутинных запросов; снижение уровня невозврата кредитов за счет улучшения оценки кредитного риска; более эффективный мониторинг соответствия требованиям; и более быстрое и точное обнаружение мошенничества. Для банковских контакт-центров механизм снижения затрат особенно очевиден – чат-боты на основе ИИ и виртуальные помощники обеспечивают круглосуточную доступность услуг без пропорциональных затрат на персонал, что позволяет учреждениям добиться значительного снижения удельных затрат на активный клиентский счет, одновременно улучшая доступность услуг. Межстрановой панельный анализ [6] подтверждает, что инновации в области технологий ИИ в банковской и финансовой сфере положительно влияют на рентабельность активов, при этом развитие ИКТ определяется как полный медиатор этого эффекта – это означает, что финансовые выгоды от ИИ реализуются за счет улучшения информационной инфраструктуры, а не только за счет технологий ИИ [33]. Этот вывод о медиации напрямую подтверждает аргумент об управлении данными: инвестиции в ИИ приносят прибыль только тогда, когда сопровождаются дисциплинированным управлением данными и управлением KPI.

Исследование внедрения ИИ в двойных банковских системах [1], проанализированное в 20 учреждениях с 2010 по 2024 год с использованием передовой аналитики на основе Python (PCA, LASSO, XGBoost), показало, что Индекс внедрения ИИ (AIAI) является единственным наиболее сильным предиктором как трансграничного финансового посредничества, так и интеграции в точки продаж, при этом удовлетворенность клиентов (CS) и циф-

ровая интеграция клиентов (DCI) являются значимыми медиаторами. Высокая прогностическая валидность индексов внедрения ИИ (AUC = 0,91 для моделей XGBoost) подтверждает целесообразность использования структурированных многомерных измерительных рамок для оценки зрелости ИИ – методологическое соображение, непосредственно связанное с архитектурой управления KPI.

На основе анализа теоретической базы предлагается интегрированная концептуальная модель, которая позиционирует трансформацию контакт-центров под управлением ИИ как систему, в которой собственная архитектура ИИ (уровень стратегических ресурсов, основанный на RBV/DCT) обеспечивает повышение операционной эффективности только при наличии двух механизмов: 1) архитектуры управления данными и KPI (теория организации, основанной на данных), которая преобразует деятельность ИИ в измеримые, институционализированные показатели эффективности, и 2) проектирования взаимодействия человека и ИИ (парадигма расширения + TAM/TOE–TAM), которое обеспечивает принятие сотрудниками, надлежащее перераспределение задач и сохранение человеческого суждения при взаимодействии высокой сложности (*рис. 1*).

Модель выдвигает три проверяемых положения, которые структурируют эмпирический анализ:

П1 (RBV/DCT): Банки, обладающие собственной внутренней инфраструктурой ИИ, демонстрируют более высокие показатели автоматизации, чем банки, использующие сторонние решения, что отражает характер VRIN суверенных активов ИИ.

П2 (Управление данными): Рост операционной эффективности происходит за счет внедрения новых ИИ инструментов и положительно опосредуется качеством архитектуры управления KPI – в частности, степенью определения метрик до внедрения системы, назначением ответственных лиц и обеспечением мониторинга в реальном времени с помощью панелей мониторинга.

П3 (Расширение возможностей): Системы ИИ для контакт-центров, разработанные на основе гибридной модели взаимодействия человека и ИИ, достигают более высоких показателей удовлетворенности клиентов и принятия сотрудниками, чем полностью автоматизированные системы, подтверждая парадигму расширения возможностей по сравнению с парадигмой замещения.

3. Методология

3.1. Дизайн исследования

В данном исследовании используется поисковый качественный метод исследования на основе анализа конкретных примеров, дополненный вторичным количественным анализом данных. Поскольку цель работы заключается в том, чтобы задокументировать, проанализировать и теоретически обосновать практику организации, являющейся лидером отрасли, наиболее подходящим методологическим выбором является исследование на основе одного конкретного случая [34]. Методология исследования конкретных случаев идеально подходит для решения исследовательских вопросов типа «как» и «почему» – в частности, касающихся конфигурации внедрения ИИ, механизмов управления KPI и условий, при которых в реальной организационной среде достигаются операционные улучшения.

Выбор «Альфа-Банка» в качестве объекта исследования теоретически обоснован: это намеренный, неслучайный выбор, обусловленный статусом организации как признанного лидера отрасли. Банк получил Гран-при на саммите CDO/CDTO (2026) за внедрение генеративного ИИ и RPA, был признан на Fintech India 2025 как «Лучшее глобальное использование ИИ в финансовых услугах» и в 2025 году внедрил первую в России интеграцию DeepSeek R1 корпоративного масштаба. Эти внешние подтверждения свидетельствуют о том, что данный пример имеет аналитическую значимость (а не просто удобен для изучения) и отвечает критерию максимальной вариативности зависимой переменной – операционной эффективности, достигаемой за счет использования ИИ. Пример также демонстрирует богатство данных в долгосрочной перспективе, с отслеживаемой и документированной траекторией внедрения ИИ, охватывающей период с 2022 по 2026 год: от первых RPA-роботов, работающих на основе жестких правил, до полноценной интегрированной экосистемы агентов, функционирующих на базе LLM. Подобная траектория позволяет отследить процессы в рамках четко разграниченных технологических поколений, что является критически важным условием обеспечения внутренней валидности исследования, основанного на анализе единичного случая.

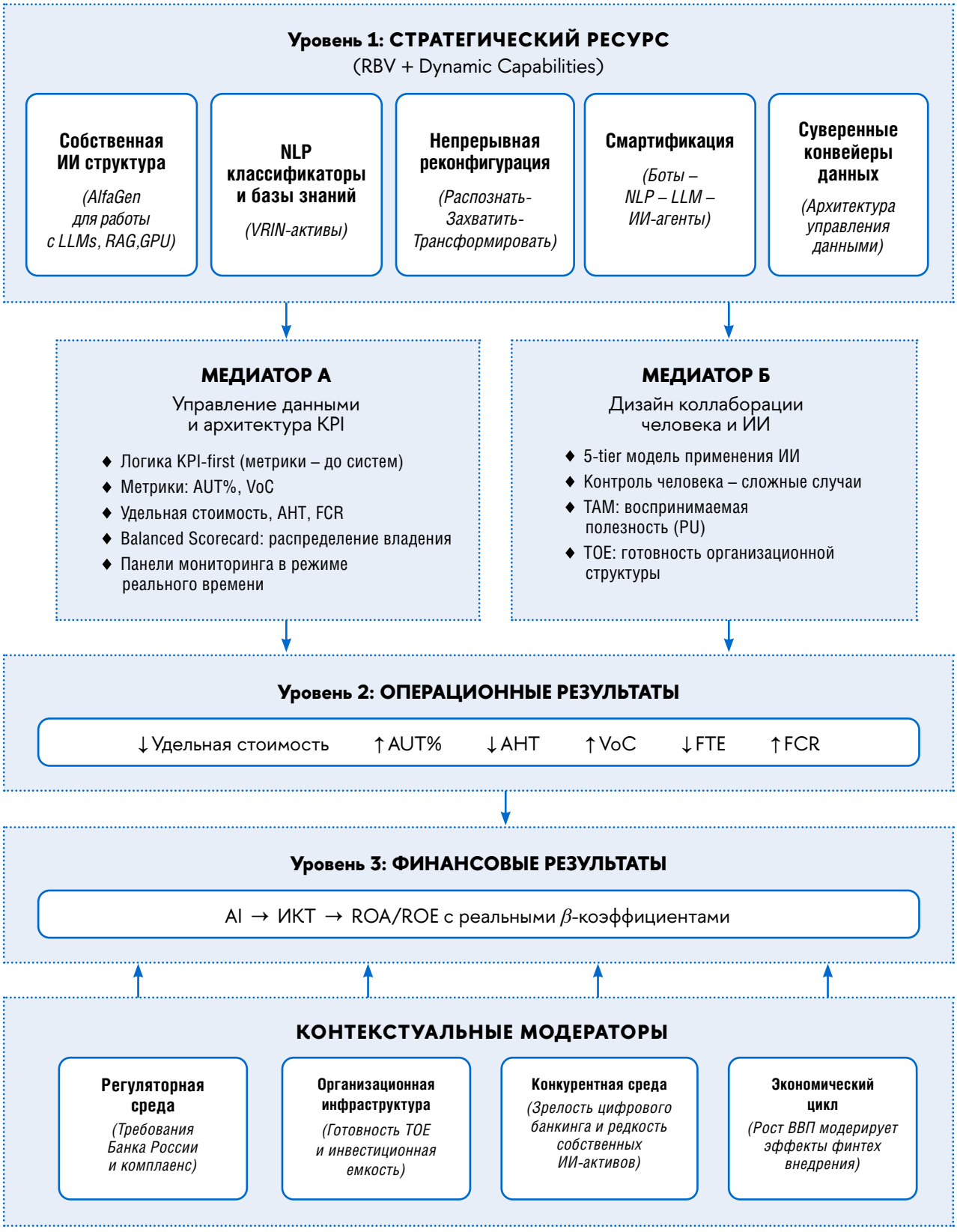


Рис. 1. Интегрированная концептуальная модель:
архитектура ИИ, управление данными и взаимодействие человека
и ИИ как совместные факторы, определяющие эффективность работы контакт-центров банков.

3.2. Источники данных и триангуляция

Анализ основан на триангуляции четырех взаимодополняющих категорий источников данных, что позволяет проводить перекрестную проверку ключевых утверждений по независимым каналам (*табл. 1*).

Триангуляция между этими типами источников обеспечивает валидность конструкции – степень соответствия измеряемых конструктов (зрелость архитектуры ИИ, качество управления KPI, изменение операционных результатов) теоретическим конструктам, лежащим в основе исследования. Сочетание количественных данных KPI с качественным картированием архитектуры и анализом процессов управления отражает смешанный характер современных исследований информационных систем.

3.3. Аналитическая процедура

Анализ проводится в три последовательных, взаимосвязанных этапа:

Этап 1. Составление карты архитектуры ИИ. Документируются и кодируются технологические уровни развертывания ИИ в контакт-центре: (а) автоматизированные боты для взаимодействия с клиентами; (б) инструменты помощи операторам (автоматический помощник, AlfaBook); (в) ИИ мониторинг качества работы оператора (AlfaQMS); и (г) ИИ для управления персоналом. Для каждого уровня регистрируются следующие параметры: функция, год развертывания, охват автоматизации (процент взаимодействия) и классификация на континууме расширения-замещения. Полученная карта архитектуры согласуется с теоретической основой расширения взаимодействия человека и ИИ, предложенная Eustaquio-Jiménez и др. [35], и операционализируется на основе пятиуровневой модели внедрения ИИ в контакт-центре.

Этап 2. Анализ показателей эффективности (KPI). Для периода 2023–2026 гг. построена продольная матрица показателей эффективности по трем операционным параметрам: (1) коэффициент автоматизации (AUT%), (2) качество обслуживания – оценка «Голос клиента» (VOC score), (3) удельная стоимость контакта. Для выявления точек перегиба в траекториях показателей и установления связи этих точек перегиба с конкретными этапами внедрения ИИ используется описательный анализ тенденций посредством трассировки процессов – стандартного инструмента для причинно-следственного анализа в качественных тематических исследованиях. Используемая структура

Таблица 1.

Категории источников данных для анализа

Категория источника данных	Конкретное содержание	Аналитическая роль
Внутренняя отчетность по производительности	Временные ряды KPI: коэффициент автоматизации (AUT%), голос клиентов (VoC), удельная стоимость (2023–2026 гг.)	Продольный количественный анализ тенденций
Документация по архитектуре ИИ	Ключевые элементы платформ контакт-центра (чат-бот, рабочее место оператора, база знаний, контроль качества и пр.) и AlfaGen (доступ к LLM, MCP слой, low-code платформа для создания агентов), примеры внедрений, график развертывания по функциональным уровням	Описательное картирование архитектуры развертывания ИИ
Аналитический бенчмаркинг	Выявлено 242 отраслевых практики; 99 внедрены в 2025–2026 гг.; система регулярного мониторинга конкурентов	Управление и анализ списка приоритетных задач; формирование конкурентной разведки
Опубликованные СМИ и официальные источники	Forbes, VC.ru, пресс-релизы о трансформации контакт-центров; доклады Банка России для общественных консультаций по вопросам применения ИИ на финансовом рынке (2023, 2025, 2026 гг.)	Внешняя валидация, контекстуализация, триангуляция
Академическая и отраслевая литература	Рецензируемые статьи по ИИ в банковском деле, внедрению чат-ботов, бизнес-аналитике на основе KPI, динамическим способностям	Теоретическое обоснование и сравнение с существующими знаниями

KPI соответствует устоявшейся практике бизнес-аналитики контакт-центров [36], которая определяет удовлетворенность клиентов, среднее время обработки обращения, стоимость контакта, решение вопроса на первом контакте в качестве основных показателей эффективности. Разложение удельной стоимости следует логике стоимости контакта на основе анализа затрат и выгод, разделяя изменения, обусловленные увеличением охвата автоматизации, от изменений, возникающих в результате корректировки персонала и эволюции коэффициента контактов.

Этап 3. Бенчмаркинг и анализ управления. На третьем аналитическом этапе рассматривается структура и функционирование регулярной системы сравнительного анализа конкурентов, созданной в 2024 году. Эта система, включающая 242 выявленные рыночные практики и структурированный процесс от конкурентной разведки до приоритизации задач, рассматривается как эмпирический пример концепции организационной ориентации на данные [2]. Анализ показывает, как внешние рыночные сигналы преобразуются в решения по продуктам, изучает ритм управления циклами обзора KPI и оценивает институциональные механизмы, посредством которых данные измерений преобразуются в действенные элементы списка приоритетных задач и стратегические обязательства.

3.4. Валидность, надежность и этические принципы

Конструктивная валидность обеспечивается описанной выше стратегией триангуляции – ни одно утверждение об архитектуре развертывания ИИ или результатах KPI не основано на одном источнике данных. Внутренняя валидность – правдоподобность причинно-следственных связей между развертыванием ИИ и улучшением производительности – проверяется с помощью трассировки процессов, которая связывает конкретные события развертывания (например, чат-бот LLM в 2024 году, база знаний с LLM в 2025, ассистент с LLM в 2026 году) с соответствующими точками перегиба в траекториях метрик. Внешняя валидность (переносимость) рассматривается как целенаправленный вопрос о масштабе исследования: в разделе обсуждения будет указано, какие элементы модели Альфа-Банка специфичны для российского банковского контекста (регуляторная среда, внутренние ограничения суверенитета, надзорная структура Банка России), а какие могут быть обобщены на крупные финансовые учреждения в сопоставимых рыночных структурах. Надежность обеспечивается лонгитюдным характером набора данных KPI и использованием официально раскрытых показателей эффективности, которые могут быть проверены независимо от интерпретации исследовательской группы.

Все эмпирические данные, использованные в этом исследовании, получены из общедоступных источников, включая отчеты компаний, заявки на получение наград, пресс-релизы (Forbes, VC.ru) и официально опубликованные показатели эффективности, а также из материалов, предоставленных организацией в неконфиденциальном контексте. В исследовании не раскрываются конфиденциальные данные клиентов, информация об отдельных клиентах, непубликуемые финансовые показатели, внутренние технические архитектуры на уровне конкурентной конфиденциальности, а также данные о персонале. Выбор и представление данных из внутренней документации по эффективности осуществляется в соответствии с принципом минимально необходимого раскрытия информации – в анализ включены только те показатели, которые были публично упомянуты организацией в пресс-материалах или отраслевых презентациях. Никакая стратегически важная информация о конкурентах не воспроизводится.

4. Результаты исследования

4.1. Архитектура развертывания ИИ: пятиуровневая модель совместного производства человеком и ИИ

Результаты показывают, что архитектура ИИ колл-центра Альфа-Банка представляет собой не единую систему, а многоуровневую, функционально интегрированную экосистему, структурированную вокруг четкого разделения между автоматизацией взаимодействия с клиентами, интеллектуальными средствами помощи операторам и аналитическим контролем. Как показано во внутренней отчетности о производительности и общедоступных данных, архитектура эволюционировала в период 2022–2026 гг. от изолированной автоматизации на основе правил к полностью интегрированной с LLM операционной среде, охватывающей пять различных функцио-

нальных уровней. Эта архитектура иллюстрирует парадигму расширения возможностей человека и ИИ, описанную в академической литературе: инструменты ИИ не заменяют операторов целиком, а скорее реструктурируют когнитивный и операционный рабочий процесс на каждом этапе взаимодействия, сокращая время обработки, повышая точность поиска информации и освобождая операторов для сложных запросов, требующих контекстного человеческого суждения.

Уровень 1. Автоматизация клиентских операций началась в банке 5 лет назад с голосовых и чат-ботов, работающих на разработанной внутри компании платформе. Они и сейчас используются в работе с физическими и юридическими лицами и покрывают более чем 140 сценариев взаимодействия. Этот слой представляет собой классическую функцию замещения, напрямую снижая нагрузку на операторов входящих запросов. В 2024 года началась интеграция больших языковых моделей в клиентские боты (20% охват к 2026 г.). LLM расширили сценарный подход: боты получили возможность понимать нестандартные формулировки и вести естественный диалог. Генеративный ИИ обеспечил переход от автоматизации ограниченного набора операций к более контекстному и качественному сервису. Следующий этап на этом уровне – внедрение LLM-агентов, способных не только отвечать на вопросы, но и в контролируемых сценариях получать и проверять данные для выполнения клиентских операций. Например, Cashback Radar в реальном времени уже анализирует транзакционные данные по обращениям о кэшбэке, существенно снижая нагрузку на операторов.

Уровень 2. База знаний с суммаризацией «AlfaBook» (первый релиз 2025 года, 100% охват). Возможности LLM распространяются на поиск информации в базе знаний: AlfaBook обрабатывает 1,8 миллиона запросов в месяц от сотрудников контакт-центра, сокращает время поиска знаний на 25 секунд на запрос и обеспечивает 80% удовлетворенность пользователей сгенерированными ответами. Этот инструмент решает одну из наиболее распространенных проблем производительности в крупных контакт-центрах – временные затраты на поиск и чтение полных статей базы знаний во время взаимодействия в режиме реального времени.

Уровень 3. Ассистент оператора на основе LLM (работает с 2026 года, охват 90%). Третий уровень функционирует внутри рабочего места оператора, а не в канале связи с клиентом. Бот-помощник на основе LLM анализирует доступную информацию по теме запроса клиента и отвечает оператору на естественном языке, фактически функционируя как механизм синтеза знаний в реальном времени. Достижение 90% охвата операторов значительно сокращает среднее время обработки запросов (AHT) и когнитивную нагрузку, связанную с навигацией по фрагментированным базам знаний.

Уровень 4. Автоматизированная система управления качеством – AlfaQMS (первый релиз 2026 года, 30% и масштабирование). Четвертый уровень применяет ИИ к функциям надзора и обеспечения качества: AlfaQMS выполняет автоматическую оценку 100% диалогов по всем каналам связи без участия экспертов. Эта возможность коренным образом трансформирует управление качеством из деятельности, основанной на выборке (обычно 2–5% взаимодействий проверяются вручную), в непрерывный процесс измерения на уровне всей популяции, позволяя систематически выявлять отклонения от сценария, нарушения соответствия и возможности для обучения в масштабах, ранее недостижимых. На момент составления отчета модуль находился на первой стадии выпуска, охватив 30% операторов, и планируется его полное внедрение в 2026 году.

Уровень 5. Наставничество с использованием ИИ и персонализированное обучение (первый выпуск в 2026 году, 10%). Пятый и самый новый уровень использует оценку на основе нейронных сетей для персонализированного обучения и адаптации операторов, обеспечивая индивидуальные пути обучения и непрерывную оценку компетенций. Этот слой расширяет логику расширения возможностей человека и ИИ из рабочего процесса предоставления услуг в функцию развития человеческого капитала.

Архитектура воплощает то, что постоянно демонстрируют данные: развертывание ИИ является не аддитивным, а интегративным. На рабочем месте оператор одновременно получает доступ к ассистенту на базе LLM (уровень 3), базе знаний AlfaBook (уровень 2), шаблонам для стикеров/push-уведомлений, общим для всех сотрудников банка ИИ-инструментам для работы с текстом – все это создает многомодальное рабочее пространство, дополненное ИИ. При этом появляется проблема перегрузки интерфейса, ограничение смещается от недостатка инструментов ИИ к эргономическому управлению

избытком ИИ. Это наблюдение является одним из наиболее аналитически значимых выводов данного примера, поскольку оно предполагает, что крупномасштабное внедрение ИИ порождает организационную проблему второго порядка – проектирование пользовательского интерфейса на уровне рабочих мест, насыщенных ИИ, – которая отсутствует в основной литературе по внедрению ИИ в контакт-центрах.

4.2. Система управления KPI: архитектура метрик, система сравнительного анализа и анализ долгосрочных показателей

Система управления эффективностью контакт-центра построена на основе трех основных групп KPI, каждая из которых измеряет отдельный аспект создания операционной ценности. Их архитектура отражает принцип организации, основанной на данных: каждый показатель отслеживается ежеквартально, с разбивкой по сегментам бизнеса (физические лица, малый и средний бизнес) и сравнивается как с внутренними целевыми показателями, так и с внешними эталонными показателями (*табл. 2*).

Многомерная архитектура KPI предотвращает искажения оптимизации, характерные для систем управления с одной метрикой. Критически важно, что AUT% и VoC отслеживаются совместно, исходя из принципа, что преимущества автоматизации действительны только в том случае, если они достигаются без соответствующего снижения удовлетворенности клиентов. Такое совместное отслеживание создает двойное ограничение, предотвращающее распространенный режим отказа агрессивной автоматизации в ущерб качеству обслуживания.

Данные за длительный период для розничного сегмента бизнеса (*табл. 3*) показывают нелинейную, но четко выраженную траекторию улучшения показателей, обусловленного ИИ.

Данные за 2024 год отражают преднамеренный переходный период: 2023 год показал, что уровень развития технологий недостаточен для того, чтобы обеспечивать высокое качество клиентского опыта обслуживания в контакт-центре, поэтому целевой уровень автоматизации был снижен с 52% до 43%, что на фоне роста обращений потребовало увеличения численности персонала и повысило стоимость обслуживания одного активного клиен-

Таблица 2.

Система управления эффективностью контакт-центра в Альфа-Банке

Метрика	Определение метрики	Охват сегментов
AUT% (коэффициент автоматизации)	Доля обращений, обработанных без участия оператора	Розничная торговля (RL) и малый и средний бизнес (SMB); голосовая связь и чат отдельно
VoC (голос клиента)	Оценка удовлетворенности клиентов (5-балльная шкала); измеряется на уровне оператора, бота, канала и сегмента	RL и SMB; общее количество обращений оператора / голосовая связь / чат / бот
Удельная стоимость	Стоимость обслуживания одного активного клиента (RUB)	Интегрированная; функциональная декомпозиция затрат

Таблица 3.

Динамика ключевых KPI – розничный сегмент, 2023-2026 гг.

Метрика	2023	2024	2025	2026*
AUT% (коэффициент автоматизации)	52%	43%	56%	64%
VoC (голос клиента)	4,0–4,3	4,5	4,5	4,6
Удельная стоимость	227	348	262	221

* целевое значение показателя в 2026 году

та. Это классический пример «долины внедрения», описанной в литературе по динамическим способностям – краткосрочные издержки производительности стратегической реконфигурации ресурсов.

Внедрение в инфраструктуру контакт-центра технологий по работе с генеративным искусственным интеллектом позволило в 2025 году вернуть уровень автоматизации к базовому уровню 2023 года (56%) и при этом не снизить уровень качества обслуживания клиентов, несмотря на увеличение объема обращений на 32% по сравнению с 2023 годом, что привело к снижению удельных затрат с 348 до 262 рублей на одного активного клиента (минус 25%). Цели на 2026 год предусматривают дальнейший рост автоматизации и снижение удельных затрат до 221 руб. при сохранении высокого уровня сервиса.

Квартальные данные VoC (Q1 2023 – Q1 2026) предоставляют наиболее аналитически значимые доказательства ценности архитектуры с двойным ограничением. Общий показатель VoC (с учетом операторских и бот-каналов) в розничном сегменте вырос с 4,04–4,25 в 2023 году до стабильного диапазона 4,48–4,53 в 2025–2026 годах, несмотря на трансформацию сервисной модели с упором на автоматизацию. Показатель качества работы канала ботов, который исторически был ниже, чем у канала операторов, улучшился с минимального значения 2,97 (Q3 2023) до 3,73 (Q4 2025), что отражает повышение качества благодаря интеграции LLM. Показатель VoC операторов в голосовом канале достиг 4,81 в Q4 2025, что является самым высоким зарегистрированным уровнем за период наблюдения, а показатель VoC операторов в чате улучшился с 4,33 (Q4 2023) до 4,64 (Q4 2025).

Главный эмпирический вывод этого совместного анализа заключается в том, что увеличение автоматизации на +10 пп, достигнутое за счет комплексной интеграции LLM в чат-бот, было достигнуто без какого-либо снижения VoC, при этом VoC растет по всем каналам контакт-центра по мере внедрения LLM на всех пяти уровнях – результат, который напрямую проверяет гипотезу о том, что качество развертывания ИИ определяется управлением данными, а не охватом автоматизации.

Дополнительно к регулярному мониторингу KPI в Альфа-Банке применяется конкурентный бенчмаркинг как институциональный механизм организации для преобразования рыночной информации в операционные улучшения. В группу эталонных аналогов входят прямые конкуренты (Сбербанк, ВТБ, Т-Банк) и некоторые лидеры инноваций в отдельных областях обслуживания. По состоянию на отчетный период в этой группе компаний было выявлено 242 практики контакт-центров; 99 из них были внедрены в 2025–2026 годах с задокументированным влиянием на клиентов, а 143 оставались в приоритетном списке задач на 2026–2027 гг. Примеры внедрения, задокументированные публично, включают обмен документами в чате, переключение категорий кэшбэка с помощью бота и комплексный сценарий информирования и корректировки тарифов для клиентов малого и среднего бизнеса. В 2026 году Альфа-Банк занял первое место в номинации «Лучшая работа входящей линии от 10 млн клиентов» в регулярном исследовании контакт-центров компаний Frank RG. Эксперты выявляли тренды рынка дистанционного обслуживания клиентов банков в России, оценивали качество услуг и сервиса, а также проанализировали показатели эффективности работы банковских контакт-центров, в том числе с помощью нейротестирований.

5. Обсуждение результатов

Результаты данного исследования вносят три аналитически значимых вклада в академическую литературу по внедрению ИИ в банковском секторе, каждый из которых расширяет или качественно уточняет существующие теоретические рамки.

Во-первых, пример Альфа-Банка предоставляет прямую эмпирическую поддержку тезису о том, что устойчивый рост производительности контакт-центров, обусловленный ИИ, происходит не за счет технической сложности отдельных инструментов ИИ, а за счет качества управления данными и архитектуры управления KPI. Снижение уровня автоматизации в 2024 году с 52% до 43% при сохранении инвестиций в ИИ не следует интерпретировать только как следствие недостаточной технологической зрелости – к 2023 году чат-бот был доступен значительной части клиентской аудитории. Более обоснованным объяснением представляется изменение управленческих приоритетов контакт-центра: переход от максимизации автоматизации как самостоятельной цели к ее балансировке с показателями клиентского опыта и качества обслуживания. Такая динамика согласуется с концепцией

динамических способностей [8]: стратегическая реконфигурация ресурсов, процессов и компетенций может сопровождаться временным снижением операционной эффективности. Восстановление уровня автоматизации до 56% в 2025 году следует связывать не только с развитием ИИ-технологий, но и с подготовкой данных, адаптацией процессов и формированием управленческого контура новой стратегии. Этому способствовали совместный мониторинг уровня автоматизации (AUT%) и показателей обратной связи клиентов (VoC), а также ежеквартальный бенчмаркинг. Эти данные переосмысливают выявленный в обзоре литературы пробел в реализации: проблема крупномасштабного внедрения ИИ в банковском секторе заключается не столько в технических, сколько в организационных аспектах, а именно, в разработке архитектуры измерения, которая предотвращает компромиссы между качеством автоматизации и показателями клиентского опыта и делает причинно-следственную связь производительности достаточно прозрачной для принятия управленческих решений.

Во-вторых, пятиуровневая архитектура ИИ, описанная в этом исследовании, выявляет характерную модель совместного производства человеком и ИИ, которую существующая литература по ИИ в контакт-центрах не полностью теоретизировала. В предыдущих исследованиях преобладающая трактовка ИИ в контакт-центрах рассматривается по бинарной оси «замена-дополнение», где чат-боты выступают в роли заменителей, а инструменты помощи операторам – в роли дополнений. Архитектура Альфа-Банка бросает вызов этой бинарной модели двумя способами. Слои 2 и 3 (AlfaBook и ассистент на базе LLM) демонстрируют, что расширение возможностей – это не единая функция, а многоуровневый когнитивный стек: структурированный поиск информации в базе знаний с обобщением (слой 2), синтез информации в реальном времени (слой 3), контекстуализация истории клиента, перефразирование ответов и системы подсказок «золотых ответов» в совокупности перестраивают эпистемическую задачу оператора, а не просто помогают ему. Что еще более важно, появление слоя 4 (AlfaQMS) и слоя 5 (AI Mentor) знаменует собой качественный переход от ИИ как инструмента предоставления услуг к ИИ как инфраструктуре организационного обучения и управления. Способность AlfaQMS оценивать 100% диалогов – по сравнению с типичной для ручных систем контроля качества частотой выборки в 2–5% – превращает управление качеством из вероятностной выборки в непрерывный процесс измерения на уровне популяции, что позволяет принимать качественно иные решения в области контроля. Этот переход от ИИ как инструмента к ИИ как институциональной инфраструктуре представляет собой новый теоретический вклад: концепция контакт-центра, управляемого ИИ, в котором системы обучения, обеспечения качества и обратной связи по производительности организации сами по себе опосредуются ИИ, а не только ее операции, ориентированные на клиентов. Проблема перегрузки интерфейсов, о которой сообщалось в 2026 году, является эмпирическим маркером этого перехода – она сигнализирует о том, что основное ограничение проектирования сместилось с возможностей ИИ на эргономику человеко-ИИ интерфейса на уровне полностью интегрированной рабочей станции.

В-третьих, система управления конкурентным бенчмаркингом расширяет концепцию организации, основанной на данных (DDO), в область – систематическую институционализацию рыночной аналитики, которую в академической литературе по DDO в значительной степени рассматривали как неявную, а не явно разработанную [16, 17]. Формализация группы из банков-аналогов, структурированный процесс от 242 выявленных практик до 99 внедрений с документированным влиянием на клиентов и 143 задачи в приоритетном списке в совокупности составляют то, что можно назвать системой конкурентного обучения – организационный потенциал, который непрерывно преобразует внешние рыночные сигналы во внутренние решения по продуктам с документированным коэффициентом конверсии. Результаты исследования, показавшие, что эта система способствовала улучшению удовлетворенности чатами внутри приложений на +7% в период с декабря 2022 года по декабрь 2025 года (с 7,88 до 8,44), в то время как оценка основного конкурента снизилась на 2% за тот же период (с 9,01 до 8,85), свидетельствуют о том, что институционализация конкурентной разведки приносит измеримые результаты, ориентированные на клиента, которые отличаются от результатов самого внедрения ИИ и дополняют их. Это наблюдение побуждает к дальнейшим исследованиям относительного вклада управления технологиями и рыночной разведкой в результаты качества обслуживания в организациях, активно использующих ИИ.

Заключение

Проанализированные в данном исследовании данные, полученные на основе долгосрочных данных KPI и задокументированной траектории внедрения ИИ в одном из крупнейших российских банков – Альфа-Банке, приводят к пяти содержательным выводам, имеющим значение как для теории, так и для практики.

1. Внедрение ИИ в контакт-центрах банков следует поэтапной траектории наращивания потенциала, а не кривой непрерывного улучшения. Данные за 2022–2026 годы показывают, что устойчивые операционные улучшения требуют последовательного завершения различных этапов внедрения: автоматизации взаимодействия с клиентами, расширения возможностей операторов, инфраструктуры знаний и аналитического надзора, а не одновременного внедрения нескольких инструментов ИИ. Временный спад производительности в 2024 году является прямым доказательством тезисов о динамических способностях, согласно которым стратегическая реконфигурация возможностей влечет за собой ограниченные, но реальные затраты, и что преждевременная оценка производительности на этапе реконфигурации приводит к систематически вводящим в заблуждение выводам о доходности инвестиций в ИИ.

2. Одновременное повышение уровня автоматизации и удовлетворенности клиентов достижимо, но требует четкого проектирования системы управления с двойными ограничениями. Квартальные данные VoC показывают, что достижения в автоматизации, полученные благодаря интеграции LLM, в частности, увеличение показателя автоматизации на 10 процентных пунктов, достигнутое в канале чат-бота, не привели к соответствующему снижению удовлетворенности клиентов. Этот результат не был случайным: он стал прямым следствием архитектуры управления, которая отслеживает AUT% и VoC совместно как основные ограничения, создавая организационную структуру стимулирования, которая предотвращает оптимизацию в первую очередь за счет автоматизации в ущерб качеству обслуживания. Этот вывод напрямую опровергает предположение, распространенное в ранних исследованиях внедрения чат-ботов, о том, что автоматизация и удовлетворенность находятся в структурном противоречии.

3. Стратегическая ценность ИИ в банковских операциях все больше заключается не в автоматизации взаимодействия с клиентами, а в инфраструктуре организационного обучения, опосредованной ИИ. Наиболее значимое долгосрочное развитие в описанной здесь архитектуре – мониторинг качества на уровне населения в AlfaQMS и персонализированное развитие компетенций в AI Mentor – работает на уровне организационного обучения, а не на уровне транзакций. По мере того, как эти системы масштабируются до полного развертывания, они трансформируют информационную среду надзорного управления, позволяя принимать решения на основе полных диалоговых совокупностей, а не выборок, и осуществлять вмешательства, направленные на индивидуальные профили развития, а не на совокупные обучающие группы. Экономическая отдача от этого уровня внедрения ИИ не отражается в показателях AUT% или удельной стоимости, что предполагает необходимость расширения существующих систем KPI по мере развития организационного интеллекта, опосредованного ИИ.

4. Институционализация конкурентной разведки является независимым фактором повышения эффективности контакт-центров, при этом отдача измеряется на уровне удовлетворенности клиентов и экспертных рейтингов. Система управления бенчмаркингом позволила внедрить за два года 99 улучшений, оказавших подтвержденное влияние на клиентский опыт, привела к улучшению удовлетворенности чатом внутри приложения на 7% по сравнению со снижением показателей конкурентов. Как следствие – Альфа-Банк возглавил рейтинг лучших контакт-центров страны. Эти результаты не сводятся к развертыванию ИИ и отражают вместо этого ценность организационного процесса, посредством которого рыночная информация систематически преобразуется в решения о продукте – процесс, который независим от технических возможностей организации в области ИИ и дополняет их.

5. Обобщаемость модели Альфа-Банка является частичной и зависит от контекста. Несколько элементов архитектуры развертывания – суверенитет платформы для работы с LLM, требования импортозамещения – специфичны для российского банковского контекста и отражают ограничения и структуры стимулирования, которые существенно отличаются от тех, с которыми сталкиваются банки в других регуляторных средах. Однако основные инновации в области управления – архитектура KPI с двойными ограничениями, институционализация конкурентного бенчмаркинга и

последовательная пятиуровневая логика развертывания – представляют собой переносимые принципы организационного проектирования, применимость которых распространяется на любой крупный банк, работающий в сопоставимом масштабе, независимо от юрисдикции регулирования. Дальнейшие сравнительные исследования, изучающие эти механизмы управления в банковских системах с различным уровнем зрелости ИИ, нормативно-правовой базой и конкурентной структурой, существенно расширят теоретическую обобщаемость представленных здесь результатов. ■

Литература

1. Iqbal M. S., Iqbal S., Rana A. AI adoption and FinTech integration in dual banking systems: Impacts on cross-border financial intermediation and POS infrastructure // Finance Research Open. 2026. Vol. 2. No. 2. Art. 100104. https://doi.org/10.1016/j.finr.2026.100104
2. AI in the Financial Sector: The Line between Innovation, Regulation and Ethical Responsibility / N. N. Ridzuan, M. Masri, M. Anshari [et al.] // Information. 2024. Vol. 15. Art. 432. https://doi.org/10.3390/info15080432
3. Business-to-business ecosystem smartification for manufacturing: A definition, an integrative framework, and future directions / M. E. Kowalski, L. A. de Vasconcelos Gomes, F. M. Borini [et al.] // Technovation. 2026. Vol. 151. Art. 103425. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103425
4. Giudici P. Fintech risk management: A research challenge for artificial intelligence in finance // Frontiers in Artificial Intelligence. 2018. Vol. 1. Art. 1. https://doi.org/10.3389/frai.2018.00001
5. Barney J. Firm resources and sustained competitive advantage // Journal of Management. 1991. Vol. 17. No. 1. P. 99–120. https://doi.org/10.1177/014920639101700108
6. Transforming banking: Examining the role of AI technology innovation in boosting banks financial performance / E. B. Gyau, M. Appiah, B. A. Gyamfi [et al.] // International Review of Financial Analysis. 2024. Vol. 96. Art. 103700. https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103700
7. From product to platform: How incumbents' assumptions and choices shape their platform strategy / M. Van Dyck, D. Lüttgens, K. Diener [et al.] // Research Policy. 2024. Vol. 53. No. 1. Art. 104904. https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104904
8. Teece D. J., Pisano G., Shuen A. Dynamic capabilities and strategic management // Strategic Management Journal. 1997. Vol. 18. No. 7. P. 509–533. https://doi.org/10.1093/0199248540.003.0013
9. Martins C., Oliveira T., Popovič A. Understanding the Internet banking adoption: A unified theory of acceptance and use of technology and perceived risk application // International Journal of Information Management. 2014. Vol. 34. No. 1. P. 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2013.06.002
10. Davis F. D. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology // MIS Quarterly. 1989. Vol. 13. No. 3. P. 319–340. https://doi.org/10.2307/249008
11. Cruzes S. Data centers in the age of AI: A tutorial survey on infrastructure, sustainability, and emerging challenges // Journal of Network and Computer Applications. 2026. Vol. 252. Art. 104525. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2026.104525
12. Beyond the hype: Organisational adoption of Generative AI through the lens of the TOE framework – A mixed methods perspective / L. Hughes, F. Davies, K. Li [et al.] // International Journal of Information Management. 2026. Vol. 86. Art. 102982. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2025.102982
13. Rahman M. M. The effect of business intelligence on bank operational efficiency and perceptions of profitability // FinTech. 2023. Vol. 2. No. 1. P. 99–119. https://doi.org/10.3390/fintech2010008
14. Chandran S., Chandran R., Achuthan K. Institutional Drivers of Green AI Adoption in Banking Sector: An Integrated TOE–TAM Analysis // Development and Sustainability in Economics and Finance. 2026. Art. 100144. https://doi.org/10.1016/j.dsef.2026.100144
15. AI driven transformation in trade finance: A roadmap for automating letter of credit document examination / M. A. Khalil, R. Padmanabhan, M. Hadid [et al.] // Digital Business. 2025. Vol. 5. No. 2. Art. 100130. https://doi.org/10.1016/j.digbus.2025.100130
16. Institutionalising the digital transition: The role of digital innovation intermediaries / A. Colovic, A. Caloffi, F. Rossi [et al.] // Research Policy. 2025. Vol. 54. No. 1. Art. 105146. https://doi.org/10.1016/j.respol.2024.105146
17. Kolagar M., Parida V., Sjödin D. Linking digital servitization and industrial sustainability performance: A configurational perspective on smart solution strategies // IEEE Transactions on Engineering Management. 2024. Vol. 71. P. 7743–7755. https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3383462
18. Abdurrahman A., Gustomo A., Prasetio E. A. Impact of dynamic capabilities on digital transformation and innovation to improve banking performance: A TOE framework study // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2024. Vol. 10. No. 1. Art. 100215. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100215

19. On the Fintech revolution: Interpreting the forces of innovation, disruption, and transformation in financial services / P. Gomber, R. J. Kauffman, C. Parker [et al.] // Journal of Management Information Systems. 2018. Vol. 35. No. 1. P. 220–265. https://doi.org/10.1080/07421222.2018.1440766

20. Pigamov S., Kitova O. V. Analysis of methodologies for the digital transformation of commercial bank-customer interactions // Modern Economy Success. 2024. No. 3. P. 331–336. https://doi.org/10.58224/2500-3747-2024-3-331-336

21. Transform me if you can: leveraging dynamic capabilities to manage digital transformation / M. H. Schneider, D. K. Kanbach, S. Kraus [et al.] // IEEE Transactions on Engineering Management. 2023. Vol. 71. P. 9094–9108. https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3319406

22. Avdoshin S. M., Pesotskaya E. Y. Explainable AI for Industry 5.0: Shedding light on the black box // Business Informatics. 2026. Vol. 20. No. 1. P. 7–28. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.1.7.28

23. Potentials and challenges of artificial intelligence in financial technologies / L. Fabri, S. Wenninger, C. Kaymakci [et al.] // MCIS 2022 Proceedings. 2022. Art. 14. https://aisel.aisnet.org/mcis2022/14

24. Hossain K. S., Ahmed F., Rahman M. H. The role of artificial intelligence-powered chatbots as a marketing tool in U.S. banking: Enhancing customer satisfaction and service efficiency // Review of Applied Science and Technology. 2025. Vol. 4. No. 2. P. 501–526. https://doi.org/10.63125/2hp9jw50

25. Chatbots in customer service within banking and finance: Do chatbots herald the start of an AI revolution in the corporate world? / G. Graham, T. M. Nisar, G. Prabhakar [et al.] // Computers in Human Behavior. 2025. Vol. 165. Art. 108570. https://doi.org/10.1016/j.chb.2025.108570

26. Global insights and the impact of generative AI-ChatGPT on multidisciplinary: a systematic review and bibliometric analysis / N. Khan, Z. Khan, A. Koubaa [et al.] // Connection Science. 2024. Vol. 36. No. 1. Art. 2353630. https://doi.org/10.1080/09540091.2024.2353630

27. Pepple D., Muthuthantrige N. Artificial intelligence, innovation and the new architecture of exploitation: Towards reconfiguring humanness in the age of algorithmic labour // Journal of Innovation & Knowledge. 2026. Vol. 11. Art. 100878. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100878

28. Milana C., Ashta A. Artificial intelligence techniques in finance and financial markets: A survey of the literature // Strategic Change. 2021. Vol. 30. No. 3. P. 189–209. https://doi.org/10.1002/jsc.2403

29. Puklavec B., Oliveira T., Popovič A. Understanding the determinants of business intelligence system adoption stages: An empirical study of SMEs // Industrial Management & Data Systems. 2018. Vol. 118. No. 1. P. 236–261. https://doi.org/10.1108/IMDS-05-2017-0170

30. Adam M., Wessel M., Benlian A. AI-based chatbots in customer service and their effects on user compliance // Electronic Markets. 2021. Vol. 31. No. 2. P. 427–445. https://doi.org/10.1007/s12525-020-00414-7

31. The future of in-store technology / D. Grewal, S. M. Noble, A. Roggeveen [et al.] // Journal of the Academy of Marketing Science. 2020. Vol. 48. No. 1. P. 96–113. https://doi.org/10.1007/s11747-019-00697-z

32. Königstorfer F., Thalmann S. Applications of Artificial Intelligence in commercial banks – A research agenda for behavioral finance // Journal of Behavioral and Experimental Finance. 2020. Vol. 27. Art. 100352. https://doi.org/10.1016/j.jbef.2020.100352

33. How artificial intelligence will change the future of marketing / T. Davenport, A. Guha, D. Grewal [et al.] // Journal of the Academy of Marketing Science. 2020. Vol. 48. No. 1. P. 24–42. https://doi.org/10.1007/s11747-019-00696-0

34. Altman E. J., Nagle F., Tushman M. L. The translucent hand of managed ecosystems: engaging communities for value creation and capture // Academy of Management Annals. 2022. Vol. 16. No. 1. P. 70–101. https://doi.org/10.5465/annals.2020.0244

35. Chatbots for customer service in financial entities – A comprehensive systematic review / R. Eustaquio-Jiménez, M. Durand-Azurza, J. Gamboa-Cruzado [et al.] // Journal of Infrastructure, Policy and Development. 2024. Vol. 8. No. 16. Art. 10122. https://doi.org/10.24294/jipd10122

36. Sandberg J., Holmström J., Lyytinen K. Digitization and phase transitions in platform organizing logics: Evidence from the process automation industry // MIS Quarterly. 2020. Vol. 44. No. 1. P. 129–154. https://doi.org/10.25300/MISQ/2020/14520

Об авторе

Владимир Вячеславович Верхошинский

Главный управляющий директор, АО «Альфа-банк», Россия, 107078, г. Москва, ул. Каланчевская, д. 27;

Email: vvverkhoshinskiy@mail.ru

ORCID: 0009-0005-3600-2619

Intelligent automation of bank contact centers: AI architecture and data-driven performance management (The case of Alfa-Bank)

Vladimir Vyacheslavovich Verkhoshinskiy
Email: vvverkhoshinskiy@mail.ru

Alfa-Bank, Moscow, Russia

Abstract

The scaling of artificial intelligence (AI) in bank contact centers is transforming customer service technologies and the mechanisms for managing operational performance. However, it remains insufficiently understood how AI architecture, data management, and the performance measurement system jointly convert technological capabilities into sustained outcomes while meeting the requirements of information and technological sovereignty. This study aims to identify the conditions for effective intelligent automation of a bank contact center and to assess the dynamics of the bank's key operational indicators. An exploratory study of Alfa-Bank's practice was conducted, supplemented by secondary quantitative analysis. The empirical base comprises time series of key performance indicators (KPIs) for 2023–2026, AI deployment documentation, competitive benchmarking materials, and corporate and open sources. The study employed data triangulation, architecture mapping, trend analysis, and process tracing. The theoretical foundation combines the resource-based view, dynamic capabilities theory, and the concept of the data-driven organization. The findings reveal a five-layer technology platform integrating customer-facing conversational systems, AI-powered agent assistance, enterprise knowledge management, automated quality assurance, and personalized learning. Generative AI extends each layer, enabling a shift from fragmented automation to an integrated, context-aware, data-driven AI environment. The effectiveness of AI is mediated by a management system that simultaneously monitors automation and customer satisfaction. In 2024, insufficient technological maturity led the bank to lower its target automation rate from 52% to 43% in order to preserve service quality. As contact volumes grew, this increased staffing requirements and the cost of serving an active customer. In 2025, systematic data management and the deployment of generative AI made it possible to raise the automation rate to 56% while maintaining quality. The study conceptualizes AI as infrastructure for organizational learning and management. It demonstrates that a dual-constraint KPI architecture and institutionalized competitive benchmarking constitute organizational capabilities that convert technological innovation into measurable service and economic outcomes.

Keywords: artificial intelligence, intelligent automation, bank contact centers, large language models, data-driven management, key performance indicators, human–AI interaction

Citation: Verkhoshinskiy, V. V. (2026). Intelligent automation of bank contact centers: AI architecture and data-driven performance management (The case of Alfa-Bank). *Business Informatics*, *20*(3), 7–28. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.7.28

References

1. Iqbal, M. S., Iqbal, S., & Rana, A. (2026). AI Adoption and FinTech Integration in Dual Banking Systems: Impacts on Cross-Border Financial Intermediation and POS Infrastructure. *Finance Research Open*, 100104. https://doi.org/10.1016/j.finr.2026.100104

2. Ridzuan, N.N., Masri, M., Anshari, M., Fitriyani, N.L., & Syafrudin, M. (2024). AI in the Financial Sector: The Line between Innovation, Regulation and Ethical Responsibility. *Information*, (15), 432. https://doi.org/10.3390/info15080432

3. Kowalski, M. E., de Vasconcelos Gomes, L. A., Borini, F. M., & Bernardes, R. C. (2026). Business-to-business ecosystem smartification for manufacturing: A definition, an integrative framework, and future directions. *Technovation*, (151), 103425. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103425

4. Giudici, P. (2018). Fintech risk management: A research challenge for artificial intelligence in finance. *Frontiers in Artificial Intelligence*, (1), 1. https://doi.org/10.3389/frai.2018.00001

5. Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, *17*(1), 99–120. https://doi.org/014920639101700108

6. Gyau, E. B., Appiah, M., Gyamfi, B. A., Achie, T., & Naeem, M. A. (2024). Transforming banking: Examining the role of AI technology innovation in boosting banks financial performance. *International Review of Financial Analysis*, *96*, 103700. https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103700

7. Van Dyck, M., Lüttgens, D., Diener, K., Piller, F., & Pollok, P. (2024). From product to platform: How incumbents' assumptions and choices shape their platform strategy. *Research Policy*, *53*(1), 104904. https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104904

8. Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic management journal*, *18*(7), 509-533. https://doi.org/10.1093/0199248540.003.0013

9. Martins, C., Oliveira, T., & Popovič, A. (2014). Understanding the Internet banking adoption: A unified theory of acceptance and use of technology and perceived risk application. *International Journal of Information Management*, *34*(1), 1–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2013.06.002

10. Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, *13*(3), 319–340. https://doi.org/10.2307/249008

11. Cruzes, S. (2026). Data centers in the age of AI: A tutorial survey on infrastructure, sustainability, and emerging challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, (252), 104525. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2026.104525

12. Hughes, L., Davies, F., Li, K., Gunaratnege, S. M., Malik, T., & Dwivedi, Y. K. (2026). Beyond the hype: Organisational adoption of Generative AI through the lens of the TOE framework – A mixed methods perspective. *International Journal of Information Management*, *86*, 102982. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2025.102982

13. Rahman, M. M. (2023). The effect of business intelligence on bank operational efficiency and perceptions of profitability. *FinTech*, *2*(1), 99–119. https://doi.org/10.3390/fintech2010008

14. Chandran, S., Chandran, R., & Achuthan, K. (2026). Institutional Drivers of Green AI Adoption in Banking Sector: An Integrated TOE–TAM Analysis. *Development and Sustainability in Economics and Finance*, 100144. https://doi.org/10.1016/j.dsef.2026.100144

15. Khalil, M. A., Padmanabhan, R., Hadid, M., Elomri, A., & Kerbache, L. (2025). AI driven transformation in trade finance: A roadmap for automating letter of credit document examination. *Digital Business*, *5*(2), 100130. https://doi.org/10.1016/j.digbus.2025.100130

16. Colovic, A., Caloffi, A., Rossi, F., & Russo, M. (2025). Institutionalising the digital transition: The role of digital innovation intermediaries. *Research Policy*, *54*(1), 105146. https://doi.org/10.1016/j.respol.2024.105146

17. Kolagar, M., Parida, V., & Sjödin, D. (2024). Linking digital servitization and industrial sustainability performance: A configurational perspective on smart solution strategies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, (71), 7743–7755. https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3383462

18. Abdurrahman, A., Gustomo, A., & Prasetio, E. A. (2024). Impact of dynamic capabilities on digital transformation and innovation to improve banking performance: A TOE framework study. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, *10*(1), 100215. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100215

19. Gomber, P., Kauffman, R. J., Parker, C., & Weber, B. W. (2018). On the Fintech revolution: Interpreting the forces of innovation, disruption, and transformation in financial services. *Journal of Management Information Systems*, *35*(1), 220–265. https://doi.org/10.1080/07421222.2018.1440766

20. Pigamov, S., & Kitova, O.V. (2024). Analysis of methodologies for the digital transformation of commercial bank-customer interactions. *Modern Economy Success*, (3), 331–336. https://doi.org/10.58224/2500-3747-2024-3-331-336

21. Schneider, M. H., Kanbach, D. K., Kraus, S., & Dabić, M. (2023). Transform me if you can: leveraging dynamic capabilities to manage digital transformation. *IEEE Transactions on Engineering Management*, (71), 9094–9108. https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3319406

22. Avdoshin, S. M., & Pesotskaya, E. Y. (2026). Explainable AI for Industry 5.0: Shedding light on the black box. *Business Informatics*, *20*(1), 7–28. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.1.7.28

23. Fabri, L., Wenninger, S., Kaymakci, C., Beck, S., Klos, T., & Wetzstein, S. (2022). Potentials and challenges of artificial intelligence in financial technologies. *MCIS 2022 Proceedings*, *14*. https://aisel.aisnet.org/mcis2022/14

24. Hossain, K. S., Ahmed, F., & Rahman, M. H. (2025). The role of artificial intelligence-powered chatbots as a marketing tool in U.S. banking: Enhancing customer satisfaction and service efficiency. *Review of Applied Science and Technology*, *4*(2), 501–526. https://doi.org/10.63125/2hp9jw50

25. Graham, G., Nisar, T. M., Prabhakar, G., Meriton, R., & Malik, S. (2025). Chatbots in customer service within banking and finance: Do chatbots herald the start of an AI revolution in the corporate world? *Computers in Human Behavior*, (165), 108570. https://doi.org/10.1016/j.chb.2025.108570

26. Khan, N., Khan, Z., Koubaa, A., Khan, M. K., & Salleh, R. B. (2024). Global insights and the impact of generative AI-ChatGPT on multidisciplinary: a systematic review and bibliometric analysis. *Connection Science*, *36*(1), 2353630. https://doi.org/10.1080/09540091.2024.2353630

27. Pepple, D., & Muthuthantrige, N. (2026). Artificial intelligence, innovation and the new architecture of exploitation: Towards reconfiguring humanness in the age of algorithmic labour. *Journal of Innovation & Knowledge*, (11), 100878. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100878

28. Milana, C., & Ashta, A. (2021). Artificial intelligence techniques in finance and financial markets: A survey of the literature. *Strategic Change*, *30*(3), 189–209. https://doi.org/10.1002/jsc.2403

29. Puklavec, B., Oliveira, T., & Popovič, A. (2018). Understanding the determinants of business intelligence system adoption stages: An empirical study of SMEs. *Industrial Management & Data Systems*, *118*(1), 236–261. https://doi.org/10.1108/IMDS-05-2017-0170

30. Adam, M., Wessel, M., & Benlian, A. (2021). AI-based chatbots in customer service and their effects on user compliance. *Electronic Markets*, *31*(2), 427–445. https://doi.org/10.1007/s12525-020-00414-7

31. Grewal, D., Noble, S. M., Roggeveen, A., & Nordfalt, J. (2020). The future of in-store technology. *Journal of the Academy of Marketing Science*, *48*(1), 96–113. https://doi.org/10.1007/s11747-019-00697-z

32. Königstorfer, F., & Thalmann, S. (2020). Applications of Artificial Intelligence in commercial banks – A research agenda for behavioral finance. *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, (27), 100352. https://doi.org/10.1016/j.jbef.2020.100352

33. Davenport, T., Guha, A., Grewal, D., & Bressgott, T. (2020). How artificial intelligence will change the future of marketing. *Journal of the academy of marketing science*, *48*(1), 24–42. https://doi.org/10.1007/s11747-019-00696-0

34. Altman, E.J., Nagle, F., & Tushman, M.L. (2022). The translucent hand of managed ecosystems: engaging communities for value creation and capture. *Annals*, *16*(1), 70–101. https://doi.org/10.5465/annals.2020.0244

35. Eustaquio-Jiménez, R., Durand-Azurza, M., Gamboa-Cruzado, J., Morales, M. L., Pajares Ruiz, N., López de Montoya, R., & Ortiz Céliz, N. M. (2024). Chatbots for customer service in financial entities – A comprehensive systematic review. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, *8*(16), 10122. https://doi.org/10.24294/jipd10122

36. Sandberg, J., Holmström, J., & Lyytinen, K. (2020). Digitization and phase transitions in platform organizing logics: Evidence from the process automation industry. *MIS quarterly*, *44*(1), 129–154. https://doi.org/10.25300/MISQ/2020/14520

About the author

Vladimir Vyacheslavovich Verkhoshinskiy

Chief Executive Officer, Alfa-Bank, 27, Kalanchevskaya St., Moscow 107078, Russia;

Email: vvverkhoshinskiy@mail.ru

ORCID: 0009-0005-3600-2619

DOI: 10.17323/2587-814X.2026.3.29.46

Визуальный инжиниринг онтологий и когнитивная психология*

Татьяна Альбертовна Гаврилова
Email: gavrilova@gsom.spbu.ru

Высшая школа менеджмента Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Визуальный инжиниринг онтологий является инструментом поддержки принятия решений в бизнесе и одновременно методологией создания корпоративных систем управления знаниями. Статья представляет собой обзор методов визуального инжиниринга онтологий с учетом научных результатов когнитивной психологии. Под визуальными моделями понимаются различные диаграммы, графики и эскизы для последующего формирования онтологий или концептуальных моделей предметных областей, идей, структур или процессов. Из известных видов моделей представления знаний выбраны онтологии, как наиболее распространенные методы моделирования. Рассматриваются вопросы влияния особенностей когнитивных стилей на дизайн онтологий и обучение в области онтологического инжиниринга. Также рассматривается специфика развития навыков визуально-аналитического мышления и обсуждаются типичные ошибки, возникающие в процессе моделирования. Статья может быть интересна бизнес-аналитикам, архитекторам систем, разработчикам интеллектуальных приложений. Предлагаемые рекомендации основаны на многолетнем опыте автора по чтению курсов «Визуально-аналитическое мышление», «Инженерия знаний» и тренингов по онтологическому инжинирингу в компаниях.

Ключевые слова: принятие решений, структурирование знаний, онтологический инжиниринг, когнитивный стиль, визуально-аналитическое мышление в бизнесе, управление знаниями

Цитирование: Гаврилова Т. А. Визуальный инжиниринг онтологий и когнитивная психология // Бизнес-информатика. 2026. Т. 20. № 3. С. 29–46. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.29.46

* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

«Подобно тому, как телескоп или микроскоп расширяют и увеличивают возможности зрения, визуализация информации усиливает когнитивные способности для понимания сложных процессов и поддержки принятия решения».

Б. Шнейдерман[1]

Введение

Визуализация испокон веков остается одним из самых действенных инструментов познания – подлинным когнитивным инструментом (“mind tool”), который превращает хаос данных в стройную картину мира. Будь то маршрут на экране автомобильного навигатора или пиктограммы на панели корпоративной кофемашины, графические модели обретают статус полноценных инструментов познания в тот момент, когда они начинают служить человеку: помогают принимать верные управленческие решения, прояснять природу сложных явлений или диагностировать запутанные процессы. Визуальный образ становится мостом между незнанием и пониманием.

К сожалению, разобщенность научных направлений привела к тому, что результаты когнитивной психологии в бизнесе при визуализации данных и знаний используются явно недостаточно [2]. Когнитивная психология – раздел психологии, изучающий такие психические процессы, как восприятие, память, мышление, язык и принятие решений. Она исследует процессы получения и обработки информации человеком [3, 4]. Использование результатов этой науки позволяет глубже понять, как следует представлять данные и знания для повышения эффективности взаимодействия, улучшения понимания и принятия коллективных решений в компаниях.

Особый интерес представляет вопрос о влиянии индивидуальных когнитивных стилей на работу с гетерогенной корпоративной информацией, особенно с визуальной информацией. Под когнитивным стилем понимается набор устойчивых индивидуальных характеристик процессов обучения, восприятия и запоминания информации, а также предпочтительного способа решения задач [5].

На сегодняшний день выявлено более 20 типов когнитивных стилей, от простых (например, рефлексивность или импульсивность) до сложных (сглаживание, подчеркивание, диапазон когнитивной эквивалентности). В данной работе рассмотрены несколько когнитивных стилей, которые представляются наиболее важными для моделирования информации.

Важность корпоративных баз знаний сегодня не подвергается сомнению. Эти хранилища опыта и знаний формируются аналитиками и экспертами на основе изучения и структурирования знаний, накопленных в компаниях, а также документов, протоколов, и других источников [6, 7]. Уже в течение двух десятилетий ведущим трендом структурирования информационного контента для баз знаний и самой популярной моделью являются онтологии, или иерархические концептуальные структуры [8–11]. По сути, онтологии представляют собой одну из моделей представления знаний. Они используются для формального и неформального согласования ментальных моделей разных экспертов в организации, превращая субъективные представления в интероперабельные структуры. В широком смысле онтологии формализуют давно известную модель представления знаний – это так называемые семантические сети (semantic maps), или концептуальные карты (concept maps). Онтология кристаллизуется вокруг корневого понятия (онтология продукта, онтология пользователя), а концептуальные карты предназначены для моделирования распределенных объемных предметных областей (например, концептуальная карта процесса формирования ценности, или концептуальная карта формирования профессиональных компетенций). Разница достаточно условна. Соответственно, онтологический инжиниринг (ОИ) представляет собой методологию, которая являет-

[1] Из интервью Hullman [1].

ся развитием инженерии знаний – науки о моделях и методах извлечения, структурирования и формализации знаний [12–16].

ОИ также активно используется при создании графов знаний. Графы знаний позволяют компаниям структурировать информацию в виде сети онтологий, где узлы представляют сущности (объекты, людей, концепции), а ребра – отношения между ними. Считается, что в отличие от реляционных баз данных, графы знаний хранят контекст и связи, имитируя человеческое мышление. Графы знаний применяются для семантического поиска (например, в Google или в корпоративных хранилищах), выработки рекомендаций и анализа данных. Онтологии перестали быть чисто академической концепцией: сегодня они лежат в основе практических решений для управления корпоративными знаниями, особенно в сочетании с графами знаний и ИИ-технологиями. Связь когнитивных наук и разработки онтологий – активно развивающаяся междисциплинарная область.

В статье представлен обзор проблематики влияния человеческого фактора (различных характеристик психологии восприятия или когнитивных стилей) на дизайн онтологий и графов знаний. Статья, основанная на многолетнем практическом опыте автора, развивает и дополняет его предшествующие работы [17, 18]. Предлагаются методические рекомендации по предотвращению ошибок в дизайне онтологий.

1. Онтология как модель представления знаний

Онтология – это модель структурирования знаний, реализованная на основе формального описания объектов, фактов и отношений между ними [18]. Исторически онтологии возникли как развитие символьных моделей [19, 20]. Символьное представление знаний используется с 1970-х годов, с того времени как появились базы знаний экспертных систем [21]. Первыми моделями представления знаний были продукции, фреймы, семантические сети и т. п. [22, 23]. Как следствие, несколько позже (в 1980-е годы) появился термин «онтология» [10]. Впоследствии появились средства автоматизированного формирования онтологий, обеспечивающие промышленное применение онтологического инжиниринга, хотя и с некоторой потерей качества моделей [24].

Созданию формальной онтологии предшествует формирование некой неформальной ментальной модели. Понятие «ментальная модель» относится к области когнитивной психологии (психологии познания) и впервые было предложено Джонсоном-Лэйрдом [25] и Бирном [26].

Современными примерами визуализации ментальных моделей являются концептуальные карты и графы, семантические сети, когнитивные карты и, конечно же, интеллект-карты или и-карты (*mind maps*) [18]. И-карты представляют собой довольно простой способ отображения знаний, поэтому они находят широкое применение в менеджменте. Однако и-карты не дают возможность глубокого анализа, поэтому для моделирования разнородных отношений чаще применяются концептуальные карты (к-карты, или семантические сети). К-карты были предложены Новаком в начале 70-х годов [27], при этом были использованы идеи Асубеля [28] о формировании понятийного мышления. К-карты, которые обычно состоят из узлов и соединяющих их направленных отношений, являются весьма эффективными для отображения понятийной системы человека.

Фактически к-карты, сфокусированные вокруг отдельных понятий и стали прообразом онтологий.

И-карты и к-карты применяются на стадии дизайна онтологии. Они обнажают «скелет» и служат «черновиком» онтологии, в то время как для программной реализации баз знаний используются языки OWL и RDF(s) [9, 29].

Однако в работах большинства авторов недостаточное внимание уделяется тем трудностям, которые встречаются при формировании семантических верхнеуровневых ментальных моделей. Причинами являются размытость, а иногда и противоречивость терминологии, а также проблемы вербализации явных и неявных знаний. Последняя проблема выходит за рамки инженерии знаний и связана с белыми пятнами когнитивных исследований. Поэтому одной из задач начальной стадии является разработка и верификация глоссария понятий предметной области и установление системы отношений между ними [30]. Для такой работы аналитики-онтологисты должны разобраться в предметной области, а также иметь развитые характеристики когнитивных стилей, описанные ниже.

Интерес к разработке онтологий нарастает также в связи с прогрессом в области графов знаний

(*knowledge graph*) и появлением корпоративных систем управления знаниями. В последние 5–10 лет наиболее перспективной технологией являются графы знаний [31, 32]. Переход от классических онтологий к графам знаний стал возможен благодаря двум ключевым факторам: миграции ИТ-инфраструктуры в облачную среду для работы с распределенными данными и совершенствованию семантических технологий, обеспечивших новый уровень связности информации. Базисом для представления данных в графах знаний служат онтологии, которые включают в себя терминологический аппарат и совокупность утверждений, касающихся моделируемых объектов [33, 34]. Структурно такой граф образуют концепты (объекты или понятия) и связывающие их отношения.

Пионером в создании подобных структур в 2000-х годах выступила компания Google, применившая данную модель для нужд своей поисковой системы [35]. При этом графы могут охватывать как междисциплинарные массивы сведений (примеры — DBpedia и Yago), так и узкоспециализированные предметные области [31, 36]. Сегодня разработаны и внедрены десятки специализированных платформ и редакторов для построения коммерческих онтологий, позволяющих компаниям создавать кастомизированные онтологии и таксономии для корпоративных графов знаний, поддерживая управление эволюцией онтологии при изменении бизнес-процессов (например, PoolParty Semantic Suite, Neo4j, решения Ontotext, платформа OpenReview и др.) [37, 38]. Так компании строят графовые СУБД для формирования графов знаний с онтологической основой (например, графы знаний поверх данных из Google Drive, SharePoint и других источников).

2. Визуальный подход к разработке ментальных моделей

Сегодня визуализация информации – будь то лаконичная инфографика или погружающая виртуальная реальность – уверенно заявляет о себе как о самостоятельной и стремительно развивающейся научной дисциплине. Ее главная миссия благородна и ясна: превращать сложнейшие понятия в простые и доступные образы, сжимать информационную вселенную до компактных, но емких форм. По сути, визуализация – это искусство компрессии, где за каждым графическим решением стоит стремление донести суть без потери смысла. Не случайно инфографику сегодня определяют как графический способ подачи данных, призванный облегчить постижение самой сложной реальности.

История науки и образования – это во многом история графических артефактов. Диаграммы, схемы, эскизы сопровождали человеческую мысль на всем ее пути, и сегодня трудно вообразить такие области, как биология, анатомия или геометрия, без их визуального языка. Визуализация – это не просто иллюстрация, это фундамент понимания.

Согласно устоявшейся практике, визуализация включает три ключевых этапа [39]: создание первоначальных набросков (понятий и процессов), их смысловой анализ и итоговое оформление ментальной модели в виде диаграммы или образа. Примечательно, что эти этапы зачастую используются на интуитивном уровне, хотя многие авторы настаивают на осознанном построении и-карт как предварительных версий онтологических моделей, поскольку такие эскизы положительно сказываются на интерпретации данных.

В основе любой визуальной конструкции лежат три элемента [40, 41]: схема расположения (двухмерное пространство), изобразительный знак (точка, линия, фигура) и его вариативные характеристики (цвет, габариты, внутреннее заполнение).

Эскизы онтологий обычно используют модели, где шаблон двумерен, его элементами являются узлы графа и связи в виде линии, а графические свойства позволяют отобразить особенности предметной области. Интеллект-карты удовлетворяют этим минимальным требованиям.

2.1. И-карта как ментальная модель предметной области

И-карты представляют собой иерархически организованные диаграммы радиального типа, предназначенные для визуализации совокупности объектов, объединенных отношением к центральному понятию [42]. При этом главное понятие помещается в центре, а остальные понятия связаны с главным ветвями, формирующими связную иерархическую структуру [43]. Пример и-карты приведен на *рисунке 1.*

Для лучшего восприятия и наглядности Тони Бьюзен, создатель интеллект-карт, ввел три простых правила, обобщающих многолетние наблюдения и



Рис. 1. Пример и-карты.

опыт визуального моделирования [42]. Эти правила декларируют обязательное использование:

- подписей и шрифтов разного размера (от крупных к уменьшенным по направлению от центра);
- различных цветов для объектов разных ветвей;
- фотографий, иконок, рисунков для увеличения наглядности.

Визуальная привлекательность и наглядность отображения сущностей делает и-карты востребованным инструментом как для проведения «круглых столов» и «мозговых штурмов», так и в ходе решения множества научных, управленческих и организационных вопросов на совещаниях, конференциях и семинарах. Поэтому сегодня и-карты широко применяются в менеджменте, для принятия решений [44], и в образовании, для повышения эффективности процессов обучения [45].

Следует отметить, что имеется достаточное число программных средств быстрого прототипирования цифровых и-карт (Freemind, Xmind, SimpleMind, Coggle, MindManager и др.).

2.2. Структурирование знаний как обобщение и детализация

Формирование и-карты – это процесс визуального структурирования знаний через их детализацию и обобщение. Детализация и обобщение – одни из основных когнитивных процессов, которые влияют как на задачи обучения, так и на понимание производственных задач.

При структурировании знаний работа начинается с составления словаря основных понятий (концептов) предметной области. Затем эти понятия объединяются в категории (обобщение) или делятся на классы (детализация), после чего выделяются взаимосвязи. Категоризация в широком смысле – это процесс образования и выделения самих категорий, членения внутреннего мира человека, а также результат классификационной (таксономической) деятельности [46]. В работах [47–49] подчеркивалась сложность и неоднозначность процессов категоризации понятий.

В классической формальной логике под обобщением принято понимать логическую операцию, заключающуюся в восхождении мысли от единичного к общему, от видового понятия к родовому [50]. Иными словами, это переход от понятия с относительно узким объемом, но насыщенным содержанием, к понятию с более широким объемом, но обедненным содержанием. Типичными иллюстрациями данной операции служат переходы: от «провайдера» к «партнеру», от «ноутбука» к «компьютеру» и т. п. В результате такого перехода родовое понятие утрачивает индивидуальные видовые признаки, вследствие чего его содержание сужается, однако объем, напротив, расширяется, охватывая большее число объектов. Классический пример: понятие «береза» (малый объем, богатое содержа-

ние) обобщается до понятия «дерево» (большой объем, бедное содержание).

Обратной по направленности логической операцией выступает ограничение (или детализация). Ограничение представляет собой нисходящий переход от понятия с большим объемом и бедным содержанием к понятию с малым объемом и содержательным многообразием. Например, детализируя абстрактное понятие «сотрудник», мы можем последовательно перейти к понятию «инженер», а затем – к более конкретному «старший инженер». Таким образом, в процессе ограничения претерпевают изменения как объем исходного понятия (он сужается), так и его содержание (оно обогащается за счет добавления новых признаков) [50].

Синтаксис моделей онтологий и графов знаний предполагает для обобщения использовать родовидовые отношения (*a kind of, AKO*), а для детализации – отношение «например» (*instance*). Это ключевые виды отношений и именно они являются каркасом иерархической структуры онтологий. В некоторых предметных областях установление такой многоуровневой структуры является неочевидной процедурой, требующей от аналитиков и экспертов наличия определенных компетенций и навыков, связанных со способностью к обобщению и детализации.

Опыт автора по разработке онтологий как для компаний, так и в рамках учебного процесса (в т. ч. при проведении корпоративных тренингов) показывает, что большинство разработчиков сталкивается с трудностями структурирования.

Анализ литературы и собственный опыт привели автора к выводу о влиянии индивидуальных когнитивных особенностей на синтез онтологий [17, 49] и на ошибки структурирования. Данная статья продолжает представление результатов исследований, изложенных в предыдущих работах.

3. Когнитивные аспекты структурирования

3.1. Влияние когнитивного стиля

Традиционно в когнитивной психологии интеллектуальные способности рассматриваются как совокупность когнитивных навыков, овладение которыми является критическим условием развития [47]. Впервые термин «когнитивный стиль» появился в психологии в середине XX века в рамках исследований индивидуальных различий в восприятии, анализе и воспроизведении информации [4]. Таким образом, когнитивный стиль – это характеристика интеллектуальной деятельности, влияющая на предпочтения в решении задач. Эти предпочтения соответствуют познавательным склонностям и возможностям конкретного человека. Согласно Холодной [3], из 20 известных стилей восемь оказывают влияние на аналитическую работу:

- полезависимость / поленезависимость;
- конкретная /абстрактная концептуализация
- узкий / широкий диапазон эквивалентности;
- ригидный / гибкий познавательный контроль;
- толерантность к нереалистическому опыту;
- сглаживание / заострение;
- импульсивность / рефлективность;
- когнитивная простота / сложность.

Ниже рассмотрены четыре характеристики когнитивных стилей, существенно влияющих на дизайн и разработку онтологий (переработано из [3]).

3.1.1. Шкала «Когнитивная простота / сложность»

В данной шкале полюс когнитивной простоты подразумевает, что человек при интерпретации данных учитывает относительно небольшое число критериев. Например, создавая онтологию процесса продаж, аналитик с такой характеристикой будет обращать внимание на текущие продажи, не уходя в глубокий анализ истории или перспектив в будущем. Таким индивидам нравятся задачи с четко определенным количеством переменных и ясными условиями. Формирование онтологий требует дополнительных усилий по выявлению неявных связей, новых понятий, скрытых принципов.

Люди, имеющие предпосылки к когнитивной сложности, воспринимают объект или информацию во всей полноте и учитывают все возможные связи.

3.1.2. Шкала «Полезависимость / поленезависимость»

Данный когнитивный стиль приобретает ключевое значение в контексте аналитической дея-

тельности. Он отражает способность индивида вычленять отдельные объекты из общего контекстуального поля, что по своей сути аналогично выделению «сигнала» на фоне «шума» (или «помех»).

В когнитивной психологии принято различать два полюса этого стиля: поленезависимые субъекты демонстрируют склонность к абстрагированию от фонового контекста и успешно изолируют целевые объекты, тогда как полезависимые, напротив, воспринимают объекты неразрывно связанными с окружающим их полем.

Указанная стилевая характеристика оказывает заметное влияние на процесс проектирования онтологий, однако наиболее выраженное воздействие она оказывает на этапе реструктуризации и интеграции разнородных онтологических моделей при их объединении. Способность человека вычленять отдельные детали или объекты из целостного контекстного поля или, напротив, воспринимать все в неразрывной связи с фоном оказывает существенное влияние на решение аналитических задач, особенно в условиях совместной деятельности [3, 51].

3.1.3. Шкала «Конкретная / абстрактная концептуализация»

Данный когнитивный стиль описывает индивидуальные различия в особенностях интерпретации (концептуализации) происходящего, обусловленные способностями к поиску различий и интеграции понятий в рамках индивидуальной понятийной системы.

Эта шкала описывает индивидуальные различия в уровне абстракции, используемом при формировании понятий и обобщений. Полюс «конкретности» характеризуется малой дифференциацией и недостаточной интеграцией понятий, а полюс абстрактности – высокой степенью дифференциации и интеграции понятий.

В литературе отмечается, что аналитики, тяготеющие к полюсу «абстрактности» соотносятся с более высокими показателями вербального интеллекта, когнитивной сложностью (см. п. 3.1.1) и высокой поленезависимостью (см п. 3.1.2). Они более успешны в решении задач по формированию понятий, а также обладают высокими показателями креативности [3, 17].

3.1.4. Шкала «Узкий / широкий диапазон эквивалентности»

Эта шкала описывает индивидуальные особенности классификации объектов, когда человек может видеть их сходство и объединять в группы по большому или малому числу признаков. Шкала характеризует индивидуальные различия в склонности использовать либо много, либо мало категорий при восприятии (т. е. демонстрировать при оценке объектов строгие детализированные, либо более обобщенные критерии). В литературе этот стилевой параметр интерпретируется как «аналитичность» (склонность выявлять различия в ряду объектов) и «синтетичность» (склонность выявлять сходство в ряду объектов) [51].

Узкий диапазон эквивалентности соотносится с более низкими показателями успеваемости, буквальностью понимания и предпочтению одинаковых простых ответов в тестах на воображение. Автором наблюдалась связь этой шкалы с успеваемостью по курсу «Визуально-аналитическое мышление».

Широкий диапазон, или «синтетичность», благоприятно влияет на проявление способности оперировать более обобщенными структурами, тогда как «аналитичность» способствует точности.

3.2. Когнитивные особенности и ошибки структурирования

Как уже обсуждалось выше, главное в дизайне онтологии сводится к формированию словаря или понятийной структуры предметной области. Иерархический характер такой структуры выводит логическую операцию «обобщение / детализация» на первый план.

Выделяют две стратегии решения этой задачи:

- дедуктивная (сверху вниз или от общего к частному);
- индуктивная (снизу вверх, от частного к общему).

Эта операция связана со всеми четырьмя когнитивными стилями, описанными выше:

- сложность / простота влияет на наполнение словаря, его мощность;
- высокая поленезависимость позволяет убрать незначительные объекты;

- абстрактная концептуализация позволяет сформировать понятия высокого уровня обобщения и дать им правильные названия;
- узкий / широкий диапазон когнитивной эквивалентности влияет на широту и объем формируемых классов.

Природные характеристики когнитивного стиля могут влиять как негативно, так и позитивно на интуитивное структурирование. В настоящее время существуют рекомендации по практическому дизайну онтологий [52, 53]. Поленезависимость – это главный когнитивный стиль для аналитика, он влияет на мощность (объем онтологии) и позволяет строить модели и графы более абстрактные, емкие и лаконичные. В то же время полезависимость ведет к перегруженным и избыточным представлениям [17].

4. Практические рекомендации по дизайну онтологий

4.1. Хорошие практики

Проведенный анализ и обзор литературы позволяет поставить новый акцент в онтологическом инжиниринге, смещая интерес разработчиков от технических деталей к когнитивным. Анализируя процесс эволюции методологии онтологического инжиниринга можно было предложить некий когнитивный регламент, ориентированный на аналитиков начального уровня. Данный регламент аккумулирует ряд эвристических правил, направленных как на повышение визуальной прозрачности моделей, так и на минимизацию когнитивных усилий при их конструировании.

В число таких правил входят:

- правило холизма (системного мышления), требующее тотального охвата элементов без селективных исключений;
- принцип парсимонии (бритва Оккама), предостерегающий от неоправданного умножения сущностей; показательным примером нарушения данного принципа служит модель на *рисунке 2*;
- типографическое требование, восходящее к дизайнерской практике;
- использование рубленых шрифтов (без засечек) вместо шрифтов типа Times New Roman для лучшей читаемости;
- лингвистическое ограничение, согласно которому каждый узел и-карты должен содержать номинативную конструкцию (именительный падеж) протяженностью не более трех лексических единиц, как, например, «железная дорога» или «входные финансовые потоки».

Когнитивный регламент помогает начинающим онтологистам-аналитикам создавать наглядные и читабельные модели.

4.2. Об ошибках

В работе [17] проанализирован 10-летний педагогический и практический опыт автора по разработке онтологий с точки зрения системного подхода. В данной статье мы обобщаем и углубляем этот анализ путем рассмотрения особенностей когнитивного стиля.

Новая классификация ошибок и нарушений при формировании и-карт представлена на *рисунке 3*. Она построена по результатам анализа и обобщения более 750 и-карт студентов направления «Менеджмент», слушателей программ дополнительного профессионального образования руководителей, а также участников корпоративных тренингов «Визуально-аналитическое мышление».

Все ошибки можно разделить на 4 категории:

- ошибки неполного знания или незнания, которые связаны с низкой квалификацией экспертов;
- синтаксические ошибки, возникающие вследствие пренебрежения правилами Бьюзена, ведут к нечитабельным картам;
- семантические (смысловые) ошибки, обусловленные лакунами и пробелами в знании и понимании устройства, структуры и природы предметной области, как следствие – неадекватные классы и подклассы, категории, неверная атрибуция к категориям.
- фрагментарность и/или хаос, связанные с особенностями когнитивного стиля аналитика (они обсуждались в разделе 3 данной статьи).

Отдельный пласт составляют синтаксические ошибки, возникающие при нарушении правил Бьюзена, касающихся выбора шрифта, цветовой гаммы и использования пиктограмм, а также при игнорировании рекомендаций по минимальной длине



Рис. 2. Пример и-карты, нарушающей когнитивный регламент[2].

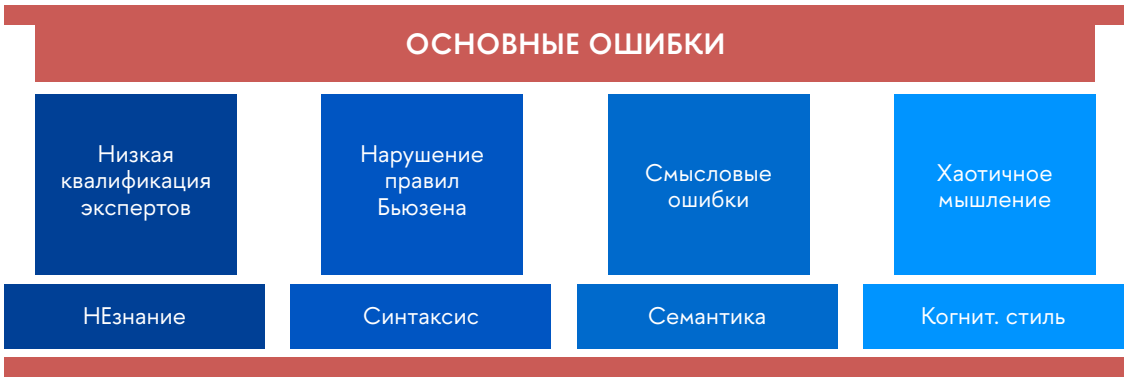


Рис. 3. Классификация ошибок дизайна и-карт.

[2] https://kwork.ru/keywords/94461/intellekt-karta-mind-map-dlya-vashego-proekta или https://www.wikipro.ru/images/4/4c/MM1.jpeg

текстовых блоков в узлах и употреблению исключительно существительных в именительном падеже единственного числа. К этой же группе допустимо относить и эргономические ошибки, хотя последние затрагивают более широкий круг аспектов.

Эргономические ошибки непосредственно связаны с дизайном и общим стилевым оформлением карты, что, безусловно, влияет на качество восприятия онтологии. Для количественной оценки эргономичности онтологических моделей Гангеми и его последователями были предложены специальные метрики [52].

Типичный перечень нарушений в данной области включает: использование более трех цветов (излишняя пестрота), наличие чрезмерно длинных или, напротив, слишком коротких ветвей (структурный дисбаланс), применение мелкого нечитабельного шрифта, смысловую и визуальную перегруженность концептами и иллюстративными элементами, а также такой трудно формализуемый критерий, как отсутствие визуальной гармонии. Вопросы гармонии в дизайне бизнес-диаграмм и онтологических моделей детально проработаны в источниках [53, 54].

Особого внимания заслуживает группа ошибок, обусловленных индивидуальными когнитивными стилями разработчика. Подобные погрешности, как отмечается в литературе, плохо поддаются исправлению или коррекции [4]. В частности, такая фундаментальная характеристика мышления, как «способность к обобщению», не развивается ни в ходе тренингов, ни с накоплением профессионального опыта. В связи с этим анализ ошибок онтологического проектирования нередко приобретает диагностическую функцию: построенная карта фактически обнажает как пробелы в предметных знаниях автора, так и особенности его когнитивного профиля.

Представляется полезным создать единый чеклист для разработчиков онтологий, который также будет служить методическим каркасом для новичков. Такой чек-лист позволит предупреждать и исправлять множественные ошибки разработчиков. К сожалению, размер статьи не позволяет представить его в полном объеме, но некоторые базовые рекомендации описаны в работах автора [17, 18].

Интересно наблюдать, как меняются роли в команде на корпоративных тренингах, когда выясняется, что глубже и точнее производственные процессы понимает не бойкий и громкий сотрудник, а «тихоня», который предлагает ясную и корректную модель, отражающую все многообразие взглядов и сложность ситуации. Это можно назвать «эффектом рождения нового лидера».

После визуализации и обсуждения онтологии встает вопрос ее «принятия», а также ее адекватности и применимости. Считается, что само наличие онтологии уже позитивно для компании. Однако распространение неверных представлений о структуре предметной области также ведет к серьезным последствиям. В компаниях обсуждение полученных онтологий иногда приводит не только к дебатам, но и к реинжинирингу процессов и ре-оркестровке архитектуры предприятия [55, 56].

Заключение

Сложность и изменчивость современного мира заставляет продвинутые и зрелые компании осмысливать процессы и структуры посредством онтологий и графов знаний, и на их основе создавать системы управления знаниями. Сегодня системы управления знаниями – это инструменты для сбора, структурирования, хранения и обмена корпоративной информацией (инструкции, опыт, решения), обеспечивающие быстрый доступ к знаниям для повышения эффективности работы. Они превращают хаотичные данные в единую актуальную базу, предотвращая потерю опыта при увольнении сотрудников и ускоряя адаптацию новичков. Использование визуального подхода к моделям знаний в системах управления знаниями положительно сказывается на эффективности ее использования, а также на ведении переговоров, коллективном принятии решений и корпоративном обучении [57]. В России управление знаниями (*knowledge management, KM*) успешно внедрено в крупных корпорациях (Россельхозбанк, Мосэнергосбыт, группа «Самолет») и многих ИТ-компаниях. Эти компании используют базы знаний для оптимизации клиентского сервиса, быстрого онбординга и сохранения экспертизы.

Например, большие банки и страховые компании используют онтологические графы знаний для отслеживания регуляторных рисков в реальном времени. Так, онтология может связывать:

«*Законодательные акты → требования → бизнес-процессы → ответственные сотрудники*»

или

«*Клиенты → транзакции → подозрительные паттерны → правила комплаенса*».

Это позволяет автоматически выявлять нарушения при изменении законодательства, так как система «понимает» семантические связи между нормами и операциями.

Онтологии сейчас являются основными моделями при создании корпоративных и университетских систем управления знаниями [58, 59] и в «старом стиле», и в новом стиле, когда предполагается использование нейросетей и больших языковых моделей, дополненное семантикой [60]. Современные когнитивные архитектуры (например, Soar, ACT-R) используют онтологические структуры для представления знаний на более высоких уровнях описания, что позволяет моделировать рассуждения агентов.

Гибридные архитектуры сочетают символические онтологии (для декларативных знаний) и нейросетевые компоненты (для перцептивных данных), отражая дуализм когнитивных процессов. Современный тренд 2024–2025 гг. – комбинация онтологий с большими языковыми моделями (*large language models, LLM*). Онтология часто служит «фактологическим ядром», которое предотвращает галлюцинации LLM, предоставляя проверенные связи между сущностями. Это позволяет более точно отвечать на сложные запросы и наоборот – агенты помогают строить онтологии [61] (blog.metaphacts.com). По оценкам аналитиков, компании, внедрившие онто-ориентированные графы знаний в 2024–2025 гг., достигли ROI 300–320% за счет ускорения поиска информации и снижения ошибок в принятии решений (medium.com).

Сейчас наблюдается не просто конвергенция, а полноценный симбиоз двух подходов, которые еще пару лет назад казались антагонистами: строгой логики онтологий и вероятностной природы генеративного ИИ. Второе рождение онтологий обусловлено тем, что они выступают в роли «скелета» для «мышц» больших языковых моделей (LLM). Если генеративная сеть хорошо справляется с «пониманием» контекста, обобщением и генерацией связного текста, то онтология обеспечивает дисциплину знаний: она задает четкие таксономии, отношения наследования и ролевые ограничения. Это позволяет преодолеть главный недостаток чистых LLM – склонность к галлюцинациям и потерю фактологической точности при работе со сложными, иерархическими данными. Онтология действует как фильтр и валидатор, гарантируя, что сгенерированный ответ не просто грамматически верен, но и структурно корректен с точки зрения предметной области.

Особенно ярко этот тренд проявляется в эволюции RAG (Retrieval-Augmented Generation) в сторону GraphRAG. Классический RAG, работающий с векторными представлениями, часто теряет смысловые связи между сущностями, воспринимая документы как «мешок слов». Графовые же базы знаний, построенные на онтологиях, позволяют ИИ-агенту «видеть» путь между понятиями. В многоагентных системах это критически важно: когда несколько агентов обмениваются информацией, онтология становится их общим языком (лингва-франка), устраняя неоднозначность трактовки терминов. Практика показывает, что такие гибридные системы демонстрируют лучшую интерпретируемость, т. е. можно проследить, на каком ребре графа основан тот или иной вывод агента, что критично для регуляторных и медицинских приложений.

Более того, онтологии перестают быть статичным «мраморным монолитом» – теперь они могут динамически эволюционировать с помощью самого генеративного ИИ. Появился новый этап онтологического инжиниринга, где LLM предлагает гипотезы о новых связях или классах на основе анализа неструктурированных текстов, а человек или агент утверждает эти изменения. Это создает замкнутый цикл самообучающейся системы: генеративный ИИ использует онтологию для точного ответа, а в процессе коммуникации накапливает данные для ее расширения. Таким образом, разработчики уходят от дилеммы «логика против статистики» к парадигме, где статистика обслуживает логику, а логика направляет статистику, что знаменует переход к зрелому инженерному применению ИИ в корпоративной среде.

Можно также выделить ряд преимуществ использования онтологий в системах управления знаниями:

- семантическая интеграция разнородных данных (структурированных и неструктурированных);
- контекстный поиск вместо ключевых слов;
- автоматическая классификация контента при его поступлении;

- поддержка эволюции знаний через управление версиями онтологии.

Данный обзор носит междисциплинарный характер, который позволяет интегрировать некоторые положения когнитивных наук в практику жизни компаний на стадии формирования базы знаний. Связь индивидуальных когнитивных стилей и процессов построения семантических структур является важной частью жизненного цикла систем управления знаниями. Основные выводы основаны на анализе литературы, тестировании аналитиков и протоколах учебных материалов. Выводы апробированы на заданиях корпоративных тренингов и практических занятий по развитию навыков визуально-аналитического мышления.

Оценка результатов учебной деятельности показала, что тренинг обеспечивает значительный прогресс в формировании зрелых когнитивных структур у большинства слушателей и студентов. Однако темпы этого прогресса неодинаковы: обучающиеся с исходно высоким уровнем поленезависимости, абстрактного и синтетического мышления демонстрируют ускоренную динамику овладения навыками онтологического инжиниринга и уже на середине курса опережают остальных по академической успеваемости. Знания из области когнитивной психологии также оказывают позитивное влияние на практику визуального инжиниринга онтологий.

Следует отметить, что принятие решений любым менеджером, ИТ-специалистом или аналитиком включает элементы логического анализа и синтеза [62]. Когнитивные стили определяют специфику процедур анализа и синтеза, поэтому учет особенностей когнитивного стиля может способствовать профессиональному росту и развитию, а навыки визуального дизайна помогут быть понятым коллегами и глубже понять что-то самому. Кроме того, в эпоху искусственного интеллекта понимание когнитивных ограничений человека помогает проектировать онтологии, которые будут интуитивно понятны пользователям и совместимы с когнитивными архитектурами агентов.

Следует признать, что индивидуальные когнитивно-стилевые характеристики обладают значительной инерционностью и слабо поддаются целенаправленной коррекции. Тем не менее, проведение специализированных тренингов представляет собой эффективный инструмент поддержки аналитиков с изначально менее развитыми способностями: такие занятия помогают минимизировать типичные ошибки и создают основу для устойчивого профессионального развития.

В этой связи при разработке образовательных программ для бизнес-аналитиков и ИТ-специалистов, ориентированных на сферу искусственного интеллекта, представляется целесообразным включение следующих дисциплин: «Инженерия знаний», «Основы когнитивной психологии», «Критическое мышление и системный анализ», и «Визуально-аналитическое мышление». Указанные курсы направлены на формирование фундаментальных навыков системно-аналитической деятельности, развитие способностей к структурированию информации, а также тренировку операций детализации и обобщения понятий. ■

Литература

1. Hullman J. The purpose of visualization is insight, not pictures: An interview with visualization pioneer Ben Shneiderman // Medium: Multiple Views: Visualization Research Explained. March 12, 2019. [Электронный ресурс]: https://medium.com/multiple-views-visualization-research-explained/the-purpose-of-visualization-is-insight-not-pictures-an-interview-with-visualization-pioneer-ben-beb15b2d8e9b (дата обращения: 13.09.2026).
2. Ishikawa T. Individual differences and skill training in cognitive mapping: How and why people differ // Topics in Cognitive Science. 2023. Vol. 15. No. 1. P. 163–186. https://doi.org/10.1111/tops.12605
3. Холодная М. А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. Москва: ПЕР СЭ, 2002.
4. Солсо Р. Когнитивная психология [пер. с англ.]. Санкт-Петербург: Питер, 2011.
5. Скотникова И. Г. Когнитивно-стилевые характеристики познавательной деятельности в задачах с неопределенностью // Образование личности. 2018. № 2. С. 60–70.
6. Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Муромцев Д. И. Инженерия знаний. Модели и методы: учебник. Санкт-Петербург: Лань, 2020.
7. Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Горовой В. А. Модели и методы формирования онтологий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 4 (46). С. 21–28.

8. Gruber T. R. A translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5. No. 2. P. 199–220. https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008

9. Otero-Cerdeira L., Rodríguez-Martínez F.J., Gómez-Rodríguez A. Ontology matching: A literature review // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 2. P. 949–971. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.032

10. Karabulut E., Pileggi S. F., Groth P., Degeler V. Ontologies in digital twins: A systematic literature review // Future Generation Computer Systems. 2024. Vol. 153. P. 442–456. https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013

11. Щукарев И. А. Особенности работы с русскоязычными онтологиями с помощью библиотеки Owlready2 на языке Python // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 2. С. 223–227.

12. Fernandez M., Gomez-Perez A., Juristo N. METHONTOLOGY: From ontological art towards ontological engineering // AAAI Technical Report SS-97-06. 1997. [Электронный ресурс]: http://oa.upm.es/5484/1/METHONTOLOGY_.pdf (дата обращения: 13.09.2026).

13. Guizzardi G., Mylopoulos J. Taking it to the next level: Nicola Guarino, formal ontology and conceptual modeling // Ontology Makes Sense. Berlin: IOS Press, 2019. P. 223–241.

14. Suárez-Figueroa M. C., Gómez-Pérez A., Fernández-López M. The NeOn methodology for ontology engineering // Ontology engineering in a networked world. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P. 9–34. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24794-1_2

15. Shimizu C., Hammar K., Hitzler P. Modular ontology modeling // Semantic Web. 2023. Vol. 14. No 3. P. 459–489. https://doi.org/10.3233/SW-222886

16. Ахмадеева И. Р., Боровикова О. И., Загорулько Ю. А., Сидорова Е. А. Сбор онтологической информации для интеллектуальных научных Интернет-ресурсов // Системная информатика. 2014. № 3. С. 13–23. https://doi.org/10.31144/si.2307-6410.2014.n3.p13-23

17. Гаврилова Т. А., Страхович Э. В. Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге // Онтология проектирования. 2020. Т. 10. № 1. С. 87–99. https://doi.org/10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99

18. Gavrilova T. Knowledge and data in artificial intelligence: A duel or a duo // Pattern Recognition and Image Analysis. 2023. Vol. 33. No 3. P. 306–312. https://doi.org/10.1134/S1054661823030136

19. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981.

20. Боргест Н. М. Онтологии проектирования от Витрувия до Виттиха // Онтология проектирования. 2018. Т. 8. № 4. С. 487–522.

21. Борисов В. В., Бобряков А. В., Мисник А. Е. Экспертные системы. М.: Универсум, 2021.

22. Van Harmelen F., Lifschitz V., Porter B. (Eds.). Handbook of knowledge representation. Amsterdam: Elsevier, 2008.

23. Загорулько Ю. А., Загорулько Г. Б. Искусственный интеллект. Инженерия знаний: учеб. пособие для вузов. М.: Юрайт, 2024.

24. Бова В. В., Лещанов Д. В., Кравченко Д. Ю., Новиков А. А. Компьютерная онтология: задачи и методология построения // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. № 4. С. 44–55.

25. Johnson-Laird P. N. Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1983.

26. Johnson-Laird P. N., Byrne R. M. Mental models or formal rules? // Behavioral and Brain Sciences. 1993. Vol. 16. No 2. P. 368–380.

27. Novak J. D. Concept maps and Vee diagrams: Two metacognitive tools to facilitate meaningful learning // Instructional Science. 1990. Vol. 19. No 1. P. 29–52

28. Ausubel D. P. Educational psychology: A cognitive view. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.

29. Вехорев М. Н., Пантелеев М. Г. Построение хранилищ онтологических баз знаний // Программные продукты и системы. 2011. № 3. С. 3–8.

30. Добров Б. В., Соловьев В. Д., Иванов В. В., Лукашевич Н. В. Онтологии и тезаурусы. М.: ИНТУИТ, 2006.

31. Бхатт Ш., Чжао Ц., Сетх А., Шалин В. Графы знаний как средство улучшения искусственного интеллекта // Открытые системы. СУБД. 2020. № 3. С. 24–26.

32. Ji S., Pan S., Cambria E., Marttinen P., Yu P. S. A survey on knowledge graphs: Representation, acquisition, and applications // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol. 33. No 2. P. 494–514. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3070843

33. Gomez-Perez J., Pan J., Vetere G., Wu H. Enterprise knowledge graph // Exploiting linked data and knowledge graphs in large organisations. Cham: Springer, 2017.

34. Муромцев Д., Волчек Д., Романов А. Индустриальные графы знаний – интеллектуальное ядро цифровой экономики // Control Engineering Россия. 2019. № 5. С. 32–39.

35. Noy N., Gao Y., Jain A., Narayanan A., Patterson A., Taylor J. Industry-scale knowledge graphs: lessons and challenges // Communications of the ACM. 2019. Vol. 62. No 8. P. 36–43. https://doi.org/10.1145/3331166

36. Sheth A., Avant D., Bertram C. System and method for creating a semantic web: пат. США № 6,311,194 / Taalee Inc. 2001.

37. Hyerle D. Visual tools for transforming information into knowledge. Thousand Oaks, CA: Corwin, 2009.

38. Inastrilla C. R. A. Data visualization in the information society // Seminars in Medical Writing and Education. 2023. Vol. 2. P. 25–29.

39. McKim R. H. Experiences in visual thinking. Monterey, CA: Brooks/Cole, 1972.

40. Card S. K., Mackinlay J. D., Shneiderman B. Readings in information visualization: Using vision to think. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999.

41. Cleveland W.S., McGill R. Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods // Journal of the American Statistical Association. 1984. No 79(387). P. 531–554. https://doi.org/10.1080/01621459.1984.10478080

42. Бьюзен Т., Бьюзен Б. Интеллект-карты. Практическое руководство. Минск: Попурри, 2010.

43. Koznov D., Larchik E., Pliskin M., Artamonov N. Mind maps merging in collaborative work // Programming and Computer Software. 2011. Vol. 37. No 6. P. 315–321. https://doi.org/10.1134/S036176881106003X

44. Дубровский Д.И. Психические явления и мозг. М.: Рипол Классик, 2013.

45. Chin-Chung Chang. The effect of concept mapping on students' learning achievements and interests // Innovations in Education and Teaching International. 2008. Vol. 45. No 4. P. 375–387. https://doi.org/10.1080/14703290802377240

46. Jeffery A.B., Maes J.D., Bratton-Jeffery M.F. Improving team decision-making performance with collaborative modeling // Team Performance Management. 2005. Vol. 11. No 1/2. P. 40–50. https://doi.org/10.1108/13527590510584311

47. Величковский Б.М. Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т. М.: Смысл, 2006.

48. Брунер Дж. Психология познания. М.: Прогресс, 1977.

49. Гаврилова Т.А., Лещева И.А. Когнитивный стиль и формирование понятийных структур знаний // Психология. 2016. Т. 13. № 1. С. 154–176.

50. Строгович М.С. Логика. М.: URSS, 2021.

51. Косихин В.В. Психологическое содержание и диагностика когнитивного стиля «Диапазон эквивалентности» // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2012. Т. 9. № 2. С. 116–131.

52. Gangemi A., Presutti V. Ontology design patterns // Handbook on ontologies. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. P. 221–243. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_10

53. Henderson K. Flexible sketches and inflexible data bases: Visual communication, conscription devices, and boundary objects in design engineering // Science, Technology, & Human Values. 1991. Vol. 16. No 4. P. 448–473. https://doi.org/10.1177/016224399101600402

54. Effinger P., Jogsch N., Seiz S. On a study of layout aesthetics for business process models using BPMN // International Workshop on Business Process Modeling Notation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 31–45. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16298-5_5

55. Днепровская Н. В., Шевцова И. В. Система менеджмента знаний в стратегическом управлении университетом // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 2. С. 20–40. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.2.20.40

56. Зараменских Е. П., Кудрявцев Д. В., Арзуманян М. Ю. Архитектура предприятия: учебник для вузов. 2-е изд., пер. и доп. М.: Юрайт, 2023.

57. Бабкин Э. А., Белова Ю. А., Кривенко А. А. Разработка и использование концептуальной модели для рекомендательной системы по образовательной программе // Цифровое образование. XXI век: сб. статей и тезисов III Междунар. практ. конф. 2020. С. 19–24.

58. Моисеева Т.В., Муханов Ю.С. О методах визуализации знаний акторов при интерсубъективном управлении разрешением проблемных ситуаций // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. Т. 65. № 1. С. 62–73.

59. Russo D., Mura G. The financial data services domain: From taxonomies to ontologies // Journal of Accounting and Finance. 2023. Vol. 23. No 1. P. 17–28.

60. Malik S., Jain S., Sharma G. FNN-ONTOCOM: A hybrid cost estimation approach using fuzzy and neural network for ontology engineering // Computational Intelligence. 2025. Vol. 41. No 3. Article e70061. https://doi.org/10.1111/coin.70061

61. Doumanas D., Bouchouras G., Soularidis A., Kotis K., Vouros G. From human- to LLM-centered collaborative ontology engineering // Applied Ontology. 2025. Vol. 19. No 4. P. 334–367. https://doi.org/10.1177/15705838241305067

62. Кравченко Т. К., Исаев Д. В. Системы поддержки принятия решений: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., пер. и доп. М.: Юрайт, 2024.

Об авторе

Татьяна Альбертовна Гаврилова
доктор технических наук, профессор;
заведующая кафедрой, кафедра информационных технологий в менеджменте, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199004, г. Санкт-Петербург, Волховский пер., д. 3
Email: gavrilova@gsom.spbu.ru
ORCID: 0000-0003-1466-8100

Visual ontology engineering and cognitive psychology

Tatiana Albertovna Gavrilova
Email: gavrilova@gsom.spbu.ru

Graduate School of Management, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Abstract

Visual ontology engineering serves as both a decision support tool in business and a methodology for creating corporate knowledge management systems. This paper provides an overview of visual ontology engineering methods, taking into account findings from cognitive psychology. Visual models are understood here as various diagrams, graphs, and sketches intended for subsequent development of ontologies or conceptual models of subject domains, ideas, structures, or processes. Among the known diagrammatic knowledge representation models, ontologies have been selected as the most widespread modeling approach. The paper examines how cognitive style characteristics influence ontology design and learning in the field of ontological engineering. It also addresses the specifics of developing visual-analytical thinking skills and discusses typical errors that arise during the modeling process. The paper may be of interest to business analysts, system architects, and developers of intelligent applications. The recommendations offered are based on the author's many years of experience teaching courses on "Visual-Analytical Thinking" and "Knowledge Engineering," as well as conducting ontology engineering trainings in companies.

Keywords: decision making, knowledge structuring, ontological engineering, cognitive style, visual-analytical thinking in business, knowledge management

Citation: Gavrilova, T. A. (2026). Visual ontology engineering and cognitive psychology. *Business Informatics, 20*(3), 29–46. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.29.46

References

1. Hullman, J. (2019, March 12). *The purpose of visualization is insight, not pictures: An interview with visualization pioneer Ben Shneiderman*. Medium: Multiple Views: Visualization Research Explained. https://medium.com/multiple-views-visualization-research-explained/the-purpose-of-visualization-is-insight-not-pictures-an-interview-with-visualization-pioneer-ben-beb15b2d8e9b

2. Ishikawa, T. (2023). Individual differences and skill training in cognitive mapping: How and why people differ. *Topics in Cognitive Science*, *15*(1), 163–186. https://doi.org/10.1111/tops.12605

3. Kholodnaya, M. A. (2002). Cognitive styles. On the nature of the individual mind. Moscow: PER SE. (In Russian).

4. Solso, R. (2011). Cognitive psychology (Trans. from English). St. Petersburg: Piter. (In Russian).

5. Skotnikova, I. G. (2018). Cognitive-style characteristics of cognitive activity in tasks with uncertainty. *Obrazovanie Lichnosti* [Personality Education], (2), 60–70. (In Russian).

6. Gavrilova, T. A., Kudryavtsev, D. V., & Muromtsev, D. I. (2020). Knowledge engineering. Models and methods. St. Petersburg: Lan. (In Russian).

7. Gavrilova, T. A., Kudryavtsev, D. V., & Gorovoy, V. A. (2006). Models and methods of ontology engineering. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal], (4), 21–28. (In Russian).

8. Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, *5*(2), 199–220. https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008

9. Otero-Cerdeira, L., Rodríguez-Martínez, F. J., & Gómez-Rodríguez, A. (2015). Ontology matching: A literature review. *Expert Systems with Applications*, *42*(2), 949–971. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.032

10. Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P., & Degeler, V. (2024). Ontologies in digital twins: A systematic literature review. *Future Generation Computer Systems*, *153*, 442–456. https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013

11. Shchukarev, I. A. (2023). Features of working with Russian-language ontologies using the Owlready2 library in Python. *Software & Systems*, *36*(2), 223–227.

12. Fernández, M., Gómez-Pérez, A., & Juristo, N. (1997). *METHONTOLOGY: From ontological art towards ontological engineering* (AAAI Technical Report SS-97-06). http://oa.upm.es/5484/1/METHONTOLOGY_.pdf

13. Guizzardi, G., & Mylopoulos, J. (2019). Taking it to the next level: Nicola Guarino, formal ontology and conceptual modeling. *Ontology makes sense* (pp. 223–241). IOS Press.

14. Suárez-Figueroa, M. C., Gómez-Pérez, A., & Fernández-López, M. (2012). The NeOn methodology for ontology engineering. *Ontology engineering in a networked world* (pp. 9–34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24794-1_2

15. Shimizu, C., Hammar, K., & Hitzler, P. (2023). Modular ontology modeling. *Semantic Web*, *14*(3), 459–489. https://doi.org/10.3233/SW-222886

16. Akhmadeeva, I. R., Borovikova, O. I., Zagorulko, Yu. A., & Sidorova, E. A. (2014). An ontological information collection for intelligent scientific internet resources. *System Informatics*, (3), 13–23. (In Russian). https://doi.org/10.31144/si.2307-6410.2014.n3.p13-23

17. Gavrilova, T. A., & Strakhovich, E. V. (2020). Visual-analytical thinking and mind maps in ontology engineering. *Ontology of Designing*, *10*(1), 87–99. (In Russian). https://doi.org/10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99

18. Gavrilova, T. (2023). Knowledge and data in artificial intelligence: A duel or a duo. *Pattern Recognition and Image Analysis*, *33*(3), 306–312. https://doi.org/10.1134/S1054661823030136

19. Pospelov, D. A. (1981). *Logical-linguistic models in control systems*. Energoizdat. (In Russian).

20. Borgest, N. M. (2018). Ontologies of design from Vitruvius to Wittich. *Ontology of Designing*, *8*(4), 487–522. (In Russian). https://doi.org/10.18287/2223-9537-2018-8-4-487-522

21. Borisov, V. V., Bobryakov, A. V., & Misnik, A. E. (2021). *Expert systems*. Universum. (In Russian).

22. Van Harmelen, F., Lifschitz, V., & Porter, B. (Eds.). (2008). *Handbook of knowledge representation*. Elsevier.

23. Zagorulko, Yu. A., & Zagorulko, G. B. (2024). A*rtificial intelligence. Knowledge engineering: A textbook for universities*. Yurayt. (In Russian).

24. Bova, V. V., Leshchanov, D. V., Kravchenko, D. Yu., & Novikov, A. A. (2014). Computer ontology: Tasks and construction methodology. *Informatics, Computer Engineering and Engineering Education*, (4), 44–55. (In Russian).

25. Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Harvard University Press.

26. Johnson-Laird, P. N., & Byrne, R. M. (1993). Mental models or formal rules? *Behavioral and Brain Sciences*, *16*(2), 368–380.

27. Novak, J. D. (1990). Concept maps and Vee diagrams: Two metacognitive tools to facilitate meaningful learning. *Instructional Science*, *19*(1), 29–52.

28. Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. Holt, Rinehart and Winston.

29. Vekhorev, M. N., & Panteleev, M. G. (2011). Building repositories for ontological knowledge bases. *Software & Systems*, (3), 3–8. (In Russian).

30. Dobrov, B. V., Solovyev, V. D., Ivanov, V. V., & Lukashevich, N. V. (2006). *Ontologies and thesauri*. INTUIT. (In Russian).

31. Bhatt, S., Zhao, Q., Sheth, A., & Shalin, V. (2020). Knowledge graphs as a means of improving artificial intelligence. *Open Systems. DBMS*, (3), 24–26. (In Russian).

32. Ji, S., Pan, S., Cambria, E., Marttinen, P., & Yu, P. S. (2021). A survey on knowledge graphs: Representation, acquisition, and applications. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *33*(2), 494–514. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3070843

33. Gómez-Pérez, J., Pan, J., Vetere, G., & Wu, H. (2017). Enterprise knowledge graph. *Exploiting linked data and knowledge graphs in large organisations*. Springer.

34. Muromtsev, D., Volchek, D., & Romanov, A. (2019). Industrial knowledge graphs — The intelligent core of the digital economy. *Control Engineering Russia*, (5), 32–39. (In Russian).

35. Noy, N., Gao, Y., Jain, A., Narayanan, A., Patterson, A., & Taylor, J. (2019). Industry-scale knowledge graphs: Lessons and challenges. *Communications of the ACM*, *62*(8), 36–43. https://doi.org/10.1145/3331166

36. Sheth, A., Avant, D., & Bertram, C. (2001). *System and method for creating a semantic web* (U.S. Patent No. 6,311,194). U.S. Patent and Trademark Office.

37. Hyerle, D. (2009). *Visual tools for transforming information into knowledge*. Corwin.

38. Inastrilla, C. R. A. (2023). Data visualization in the information society. *Seminars in Medical Writing and Education*, *2*, 25–29.

39. McKim, R. H. (1972). *Experiences in visual thinking*. Brooks/Cole.

40. Card, S. K., Mackinlay, J. D., & Shneiderman, B. (1999). *Readings in information visualization: Using vision to think*. Morgan Kaufmann.

41. Cleveland, W. S., & McGill, R. (1984). Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods. *Journal of the American Statistical Association*, *79*(387), 531–554. https://doi.org/10.1080/01621459.1984.10478080

42. Buzan, T., & Buzan, B. (2010). *The mind map book* [Russian translation]. Popurri. (In Russian).

43. Koznov, D., Larchik, E., Pliskin, M., & Artamonov, N. (2011). Mind maps merging in collaborative work. *Programming and Computer Software*, *37*(6), 315–321. https://doi.org/10.1134/S036176881106003X

44. Dubrovsky, D. I. (2013). *Mental phenomena and the brain*. Ripol Klassik. (In Russian).

45. Chang, C.-C. (2008). The effect of concept mapping on students' learning achievements and interests. *Innovations in Education and Teaching International*, *45*(4), 375–387. https://doi.org/10.1080/14703290802377240

46. Jeffery, A. B., Maes, J. D., & Bratton-Jeffery, M. F. (2005). Improving team decision-making performance with collaborative modeling. *Team Performance Management*, *11*(1/2), 40–50. https://doi.org/10.1108/13527590510584311

47. Velichkovsky, B. M. (2006). *Cognitive science: Foundations of the psychology of cognition* (Vols. 1–2). Smysl. (In Russian).

48. Bruner, J. (1977). *Psychology of cognition* [Russian translation]. Progress. (In Russian).

49. Gavrilova, T. A., & Leshcheva, I. A. (2016). Cognitive style and the formation of conceptual knowledge structures. *Psychology*, 13(1), 154–176. (In Russian).

50. Strogovich, M. S. (2021). *Logic*. URSS. (In Russian).

51. Kosikhin, V. V. (2012). Psychological content and diagnosis of the "Range of Equivalence" cognitive style. Psychology. *Journal of the Higher School of Economics*, *9*(2), 116–131. (In Russian).

52. Gangemi, A., & Presutti, V. (2009). Ontology design patterns. *Handbook on ontologies* (pp. 221–243). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_10

53. Henderson, K. (1991). Flexible sketches and inflexible data bases: Visual communication, conscription devices, and boundary objects in design engineering. *Science, Technology, & Human Values*, *16*(4), 448–473. https://doi.org/10.1177/016224399101600402

54. Effinger, P., Jogsch, N., & Seiz, S. (2010). On a study of layout aesthetics for business process models using BPMN. *International Workshop on Business Process Modeling Notation* (pp. 31–45). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16298-5_5

55. Dneprovskaya, N. V., & Shevtsova, I. V. (2023). Knowledge management system in strategic university management. *Business Informatics*, *17*(2), 20–40. (In Russian). https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.2.20.40

56. Zaramenskikh, E. P., Kudryavtsev, D. V., & Arzumanyan, M. Yu. (2023). Enterprise architecture: A textbook for universities (2nd ed.). Yurayt. (In Russian).

57. Babkin, E. A., Belova, Yu. A., & Krivenko, A. A. (2020). Development and use of a conceptual model for an educational program recommendation system. *Digital education. 21st century: Proceedings of the 3rd International Practical Conference* (pp. 19–24). (In Russian).

58. Moiseeva, T. V., & Mukhanov, Yu. S. (2020). On methods of actors' knowledge visualization in intersubjective management of problem situation resolution. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series, 65*(1), 62–73. (In Russian).

59. Russo, D., & Mura, G. (2023). The financial data services domain: From taxonomies to ontologies. *Journal of Accounting and Finance, 23*(1), 17–28. https://articlearchives.co/index.php/JAF/article/view/5765

60. Malik, S., Jain, S., & Sharma, G. (2025). FNN-ONTOCOM: A hybrid cost estimation approach using fuzzy and neural network for ontology engineering. *Computational Intelligence*, *41*(3), e70061. https://doi.org/10.1111/coin.70061

61. Doumanas, D., Bouchouras, G., Soularidis, A., Kotis, K., & Vouros, G. (2025). From human- to LLM-centered collaborative ontology engineering. *Applied Ontology*, *19*(4), 334–367. https://doi.org/10.1177/15705838241305067

62. Kravchenko, T. K., & Isaev, D. V. (2024). *Decision support systems: A textbook and workshop for universities* (2nd ed.). Yuray. (In Russian).

About the author

Tatiana Albertovna Gavrilova

Doctor of Sciences (Technology), Professor;

Head of Department, Department of Information Technologies in Management, Graduate School of Management, St. Petersburg State University, 3, Volkhovsky Pereulok, St. Petersburg 199004, Russia;

Email: gavrilova@gsom.spbu.ru

ORCID: 0000-0003-1466-8100

DOI: 10.17323/2587-814X.2026.3.47.68

Исследования ИИ-агентов в экономике и компьютерных науках: тематические направления, динамика и перспективы

Юлия Николаевна Найденова [a]
Email: yunaydenova@hse.ru

Петр Андреевич Паршаков [a]
Email: pparshakov@hse.ru

Алексей Олегович Смирнов [a]
Email: aosmirnov@hse.ru

Елена Анатольевна Шакина [b]
Email: eshakina@hse.ru

Евгения Андреевна Шенкман [a]
Email: shenkmanea@gmail.com

[a] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Пермь, Россия
[b] Университет Виго, Виго, Испания

Аннотация

В статье представлен систематизированный обзор академических публикаций, посвященных автономным ИИ-агентам, на основе анализа 1634 работ из международных рецензируемых журналов, входящих в базу Scopus. С применением тематического моделирования на основе контекстуализированных эмбеддингов BERTopic выделены ключевые направления исследований ИИ-агентов в компьютерных науках и применения в социальных науках. Выделены тринадцать ключевых направлений, которые объединены в следующие широкие группы: взаимодействие и коммуникация ИИ-агентов, прикладное применение ИИ-агентов, этика и доверие к ИИ-агентам, обучаемость и адаптивность ИИ-агентов. Проведенный обзор позволил выявить рост интереса к исследованию взаимодействия человека и ИИ-агента, а также что эволюция

тематик сместилась от формальных моделей планирования к интеграции больших языковых моделей и самообучающихся систем. Кроме того, можно отметить доминирование организаций США в количестве опубликованных исследований и активное развитие данного направления исследований в Китае при значительном отставании всех остальных стран. В заключении работы отмечены перспективные научные области, такие как координация гетерогенных агентов в условиях неопределенности и оценка социотехнических последствий их внедрения.

Ключевые слова: ИИ-агенты, систематизированный обзор, компьютерные науки, социальные науки, тематическое моделирование, BERTopic, развитие направлений исследований, страновые исследовательские тренды

Цитирование: Исследования ИИ-агентов в экономике и компьютерных науках: тематические направления, динамика и перспективы / Ю. Н. Найденова и [др.] // Бизнес-информатика. 2026. Т. 20. № 3. С. 47–68. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.47.68

Введение

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие искусственного интеллекта и связанных с ним технологий, в результате чего было сформировано новое направление исследований и приложений – автономные ИИ-агенты. Под ИИ-агентом обычно понимается программно-аппаратная система, способная самостоятельно воспринимать информацию из окружающей среды, выстраивать модель мира, принимать решения для достижения заданных целей и выполнять действия без непосредственного вмешательства человека [1, 2]. В основе подобных агентов лежат методы машинного обучения, планирования и оптимизации, а также компоненты для взаимодействия через текстовые, голосовые и мультимодальные интерфейсы. Благодаря сочетанию алгоритмов глубокого обучения, обработки естественного языка и распределенных вычислений современные ИИ-агенты приобретают способность адаптироваться к изменяющимся условиям, самостоятельно пополнять свои знания и координировать действия в масштабных системах, что выводит их за рамки традиционных экспертных систем и устойчивых программных модулей.

Актуальность изучения автономных ИИ-агентов обусловлена несколькими факторами. Во-первых, возросшая вычислительная мощность и доступность больших объемов данных позволяют создавать сложные модели поведения, способные решать ранее недоступные задачи в реальном времени [3]. Во-вторых, широкое внедрение агентов в экономические и социальные процессы – от алгоритмической торговли и управления цепями поставок до интеллектуальных помощников и сервисных роботов – порождает новые вызовы в области безопасности, этики и управляемости систем [4–7]. Кроме того, междисциплинарная природа исследований ИИ-агентов требует объединения знаний из компьютерных наук, экономики, когнитивных и социальных дисциплин, что и обуславливает необходимость систематического осмысления существующей литературы и выявления «белых пятен» в понимании их возможностей и ограничений.

Целью исследования является проведение систематического обзора посвященных автономным ИИ-агентам академических публикаций, индексируемых в международных базах цитирования за последние десятилетия, для выявления ключевых направлений, тенденций и исследовательских подходов в данной области. В качестве методологической основы исследования задействовано количественное тематическое моделирование, с помощью которого идентифицируются ключевые кластеры тем и прослеживается эволюция тематических фокусов во времени. Параллельно реализован качественный анализ, включающий сопоставление технических инноваций в области машинного обучения и планирования с другими областями знания. Благодаря такому комбинированному подходу обеспечивается не только широкая картина иссле-

довательских трендов, но и глубокое понимание того, как различные дисциплины влияют на формирование представлений об автономных ИИ-агентах и на их разработку и применение.

В результате исследования выделены несколько крупных предметных областей, представляющих научный интерес:

- мультимодальные интерфейсы и коммуникация агентов с людьми;
- адаптивное обучение в динамичных средах;
- применение агентов в распределенных вычислительных системах и автономных робототехнических платформах;
- этические и нормативные аспекты деятельности агентов.

Актуальность систематизации исследований ИИ-агентов обусловлена быстрым ростом публикационной активности и одновременной неоднородностью подходов к классификации и описанию предметной области. Существующие обзоры зачастую фокусируются на отдельных аспектах (архитектуры, применение в конкретных доменах) и не дают целостной картины. В данной работе предпринята попытка устранить этот пробел: предложена единая структура тематического пространства исследований ИИ-агентов и выделены ключевые классы агентов. На основе количественного анализа публикаций выявлены временные тренды, отражающие динамику развития отдельных направлений. По результатам анализа сформулированы рекомендации по преодолению методологических и прикладных ограничений, которые могут быть полезны как исследователям, так и практикам при планировании работ и распределении ресурсов.

1. Описание источников данных

Для анализа научных публикаций по теме агентного искусственного интеллекта были использованы данные из международной библиографической базы Scopus. Выбор базы обусловлен, во-первых, тем, что в Scopus представлены как статьи в научных журналах, так и материалы научных конференций, то есть публикации, наиболее оперативно отражающие развитие академической дискуссии по теме агентного искусственного интеллекта. Во-вторых, по этим публикациям доступны библиографические данные, включая сведения о цитируемости, что необходимо для анализа не только количественной динамики, но и академической видимости и влияния работ.

В выборку вошли все статьи и материалы конференций, отнесенные в Scopus к следующим областям знаний: «Бизнес», «Экономика», «Социальные науки», «Науки о принятии решений» и «Компьютерные науки». Поиск проводился с использованием следующего логического запроса:

TITLE-ABS-KEY((«AI agent» OR «ИИ-агент» OR «ИИ агент» OR «Agentic AI»))*

Тексты исследований были собраны в апреле 2025 года, выборка составила 1634 публикаций. Первая релевантная работа в нашей выборке была опубликована в 1984 году, а заметный рост интереса к теме наблюдается с 2016 года.

Анализ типов публикаций выявил дисбаланс в распределении источников: 68% составляют доклады конференций, 32% – статьи в научных журналах. В тематическом разрезе около 70% публикаций относятся к «Компьютерным наукам», «Инженерным наукам» и «Математике». При этом наблюдается тенденция к расширению междисциплинарности: по мере роста внедрения ИИ-агентов увеличивается доля работ в области «Социальных наук» и «Наук о принятии решений», что отражает растущий интерес к прикладным и управленческим аспектам технологии.

Лидерами по количеству публикаций являются журнал IEEE Access и серия докладов конференций Lecture Notes in Computer Science. Следует отметить, что при этом Lecture Notes in Computer Science также лидируют по средней цитируемости работ, в то время как среди журналов наибольший средний уровень цитирований наблюдается в журнале Computers in Human Behavior, посвященному изучению использования компьютеров с психологической точки зрения.

Если рассматривать источники с наибольшей средней цитируемостью работ, то источники, вошедшие в топ по данной метрике, представлены, как правило, одной или двумя публикациями. Среди журналов лидирует Quantitative Science Studies (397 цитирований на одну статью), а среди конференций – CVPR 2017 (562 цитирования на статью). Также важный вклад исследований по тематике ИИ-агентов можно отметить в маркетинге и коммуникациях.

2. Методология

В данном исследовании для выявления ключевых тем в корпусе академических публикаций применяется недавно разработанный подход – метод тематического моделирования BERTopic [8]. В отличие от вероятностных моделей (например, LDA), BERTopic использует контекстуализированные трансформерные эмбеддинги, что позволяет учитывать смысл слов в контексте предложения и документа. Это обеспечивает более точное выявление семантических связей и высокую интерпретируемость тем. Кроме того, метод устойчив к шуму, способен отделять малые и зарождающиеся тематические кластеры и хорошо подходит для анализа быстро развивающихся научных областей, таких как исследования ИИ-агентов.

Перед проведением анализа были выполнены несколько подготовительных шагов. Во-первых, был сформирован корпус текстов, включающий заголовки и аннотации научных публикаций. Во-вторых, хотя BERTopic не требует строгой предобработки (избыточная очистка искажает семантику), была проведена минимальная нормализация текста для устранения явно нерелевантной информации. В частности, были удалены все издательские сведения, а также типовые структурные маркеры аннотаций[1].

Алгоритм BERTopic включает четыре основных этапа [8].

На первом этапе осуществляется преобразование текстов в векторные представления с использованием модели Sentence-BERT (SBERT). В отличие от базовой конфигурации в этом исследовании применялась предобученная модель «all-mpnet-base-v2», генерирующая 768-мерные эмбеддинги, которая, согласно последним исследованиям превосходит другие модели в семантическом сопоставлении и извлечении ключевых слов [9].

Следующие три этапа воспроизводят базовую методологию BERTopic. На втором этапе выполняется понижение размерности векторных представлений с помощью алгоритма UMAP со следующими параметрами: число соседей – 15, размерность целевого пространства – 5, минимальное расстояние – 0 и метрика косинусного сходства. Подобная конфигурация позволяет устранить малозначимые признаки, сохранив при этом глобальную и локальную структуру эмбеддингов для более точной последующей кластеризации. Далее алгоритм HDBSCAN группирует полученные векторы в кластеры. Основными параметрами здесь являются минимальный размер кластера и количество ближайших соседей, задающее локальный контекст в UMAP. При тестировании диапазона значений от 5 до 40 лучший результат был получен при минимальном размере кластера 30; число соседей оставлено равным 15. Для измерения расстояний используется евклидова метрика, а отбор устойчивых кластеров выполняется по методу EOM. Итоговые кластеры и представляют собой выявленные темы. Завершающий этап – интерпретация тем с помощью c-TF-IDF: документы каждого кластера объединяются в единый корпус, после чего вычисляется вес каждого термина, отражающий его относительную значимость в рамках данного кластера по сравнению с остальными.

В дополнение к этому этапу была настроена модель векторизации и выделения тем. Использовался модифицированный CountVectorizer с униграммами и биграммами, минимальной частотой термина 2 и исключением стоп-слов. Для улучшения интерпретируемости тем применялась модель KeyBERTInspired, отбирающая релевантные термины на основе семантической близости.

3. Результаты

3.1. Ключевые направления исследований

В результате тематического моделирования были выделены тринадцать ключевых направлений исследований (*табл. 1*), которые мы дополнительно разбили на четыре группы: взаимодействие и коммуникация ИИ-агентов, обучаемость и адаптивность ИИ-агентов, прикладное применение ИИ-агентов, этика и доверие к ИИ-агентам.

[1] Полный перечень удаленных выражений: Purpose, Finding, Research limitation/implication, Originality/value, Result, Research limitation, Objective, Method, Conclusion, Practical implication, Social Implication, Method of research, Design/methodology/approach, Research Summary, Managerial Summary, Framing of the research, Purpose of the paper, Methodology, Originality of the paper, Background, Introduction, Results and discussion, Copyright, Discussion, Context, Abstract, Article Highlights, Highlights, Research background, Purpose of the article, Findings & value added

Таблица 1.

Ключевые направления исследований

Группа направлений	Направление	Ключевые слова
Взаимодействие и коммуникация ИИ-агентов	ИИ-агенты и большие языковые модели	conversational ai, natural language, chatbot, language model, large language
	Социально-адаптивные ИИ-агенты	ai service, conversational ai, intelligence ai, chatbot, social presence
	Мультимодальное взаимодействие и ИИ-агенты	dialog, vision language, dialogue, question answering, multimodal
Обучаемость и адаптивность ИИ-агентов	Адаптивное обучение с подкреплением для кооперации человек – ИИ	reinforcement learning, human ai, reward shaping, multi agent, human behavior
	Адаптивные RL-агенты в периферийных сетях 6G	edge computing, 6g networks, intelligence ai, sdn, reinforcement learning
	Автономные агенты с непрерывным обучением	intelligence ai, continual learning, reinforcement learning, design agent, lifelong learning
Прикладное применение ИИ-агентов	Обучение с ИИ-агентами	ai literacy, intelligence ai, conversational ai, ai tools, learners
	ИИ-агенты в игровых средах	game ai, reinforcement learning, deep reinforcement, intelligence ai, machine learning
	ИИ-усиленная креативность и генерация идей	ai creative, ai collaboration, ideation, brainstorming, creative systems
	ИИ-агенты в автоматизации разработки ПО	software engineering, software development, ai participants, pair programming, software systems
Этика и доверие к ИИ-агентам	Этические и моральные аспекты ИИ-агентов	intelligence ai, ai systems, morality, robots, intelligence
	Доверие и взаимодействие в командах «человек – ИИ»	trust ai, ai team, human ai, trust human, ai human
	Объяснимые ИИ-системы и интерпретация решений	reasoning ai, explanation generation, explanations, decision support, interpretable

Ниже представлено краткое описание каждого из направлений на основе наиболее релевантных и высоко цитируемых работ в разбивке по группам направлений.

Первая группа направлений исследований «Взаимодействие и коммуникация ИИ-агентов» характеризует, как ИИ-агенты общаются и взаимодействуют как с людьми, так и между собой. На эту группу приходится около 31,1% всей выборки документов.

Наиболее представленным направлением как в рамках группы, так и во всей выборке (11,6% публикаций) является тема *ИИ-агентов и больших языковых моделей (LLM)*. В последние годы, особенно в 2022–2024 гг., наблюдается ускоренное развитие таких систем благодаря их способности автономно планировать действия, адаптироваться к пользовательскому контексту и масштабировать взаимодействие. В прикладных сценариях, прежде всего в клиентском сервисе, платформы, такие как Alexa и Google Assistant, используют самообучающиеся алгоритмы, минимизирующие ручную аннотацию данных [10]. Системы анализа пользовательских переформулировок на основе поглощающих марковских цепей позволяют снижать частоту ошибок и оперативно корректировать ответы агентов [10], что обеспечивает устойчивую работу и эффективное масштабирование в реальном вре-

мени. Кроме того, все более активно исследуются возможности LLM-агентов в задачах координации распределенных систем и взаимодействия в многозадачных средах, где требуется адаптация к новым партнерам и сценариям [11].

Следующее направление исследований посвящено использованию *социально-адаптивных ИИ-агентов* в коммуникации с людьми и составляет около 10,9% в выборке. Современные социально-адаптивные ИИ-агенты активно интегрируются в цифровые коммуникации, сочетая эмоциональный интеллект, персонализацию и стратегическое позиционирование для повышения доверия пользователей. Исследования подчеркивают роль искусственной эмпатии ИИ ассистентов [12]. Исследования рассматривают, как на восприятие и поведение пользователя влияют стиль взаимодействия (теплый/компетентный) [13] или присвоение ИИ должности [14]. Использование многоканальной стратегии, синхронизирующей текстовые, голосовые и визуальные сигналы, создает целостный пользовательский опыт.

Направление исследований, посвященное интеграции *мультимодального взаимодействия и ИИ-агентов*, демонстрирует как современные диалоговые системы трансформируют коммуникацию человека и искусственного интеллекта, объединяя текст, аудио, видео и сенсорные данные для решения задач в реальных условиях. Универсальные агенты, основанные на передовых архитектурах, способны генерировать контент в любых модальностях, что расширяет их применение в клиентских сервисах и образовании [15]. Воплощенные ИИ-агенты успешно решают задачи навигации к удаленным целям на основе языковых инструкций [16], а также реализуют «ментальное моделирование» для стратегического планирования в физических средах [17]. Мультимодальные подходы улучшают распознавание сложных аспектов коммуникации, таких как сарказм, а интеграция мультиканальных моделей позволяет повысить эффективность виртуальных ассистентов за счет синхронизации текстовых и визуальных данных.

Вторая группа направлений, обозначенная как «Обучаемость и адаптивность ИИ-агентов», составляет 10,8% от общей выборки и является наименее представленной среди всех групп. Она посвящена обучению и адаптации ИИ-агентов и фокусируется на методах, которые позволяют агентам учиться и адаптироваться в динамичных условиях.

Исследования в рамках направления *Адаптивное обучение с подкреплением для кооперации человек – ИИ* исследуют методы создания агентов, способных динамически адаптироваться к стратегиям новых партнеров (включая людей) в неопределенных средах, преодолевая ограничения классических методов, таких как самообучение, формирующее жесткие конвенции [18]. Исследования показывают, что проблема кооперативной несовместимости в Zero-Shot Coordination может решаться через графовые модели оценки стратегий [19], а активное участие человека и оффлайн-обучение на данных взаимодействий улучшают безопасность и адаптивность к субоптимальному поведению [20, 21].

Адаптивные RL-агенты в периферийных сетях 6G – направление, фокусирующееся на интеграции адаптивных ИИ-агентов в распределенные сети 6G для оптимизации задержек, энергоэффективности и управления ресурсами. Ключевая проблема – распределение задач между устройствами, периферийными серверами и облаком при работе с мультимодальными данными и LLM [22]. Предлагаемые решения внедряют алгоритмы совместного размещения агентов [23], обучение с имитацией для оптимизации в реальном времени [24], и акцентируют внимание на интеграцию LLM в мобильные устройства [25].

Исследования в рамках направления *автономные агенты с непрерывным обучением* ориентированы на создание ИИ-систем, способных адаптироваться к динамичным средам и обновлять знания на протяжении всего жизненного цикла. Ключевой проблемой является минимизация катастрофического забывания и эффективное усвоение новых данных при ограниченных ресурсах, что достигается методами инкрементного обучения с воспроизведением прошлых классов [26] и генеративными подходами к созданию синтетических данных [27].

Третья группа направлений, получившая наименование «Прикладное применение ИИ-агентов», является крупнейшей по объему и охватывает 41% всех проанализированных публикаций. Она связана с конкретными областями прикладного применения ИИ-агентов: игры, креативность, разработка программного обеспечения (ПО).

Исследования по применению *ИИ-агентов в игровых средах* фокусируются на преодолении сложных задач, таких как обработка огромных пространств действий, управление частичной на-

блюдаемостью и масштабирование в динамических многопользовательских сценариях. Современные работы используют глубокое обучение с подкреплением (DRL) и гибридные методы для достижения сверхчеловеческой производительности в различных жанрах игр [28]. Ключевые подходы включают: глубокое обучение с подкреплением (deep reinforcement learning) для генерации разнообразных стратегий [28], маскирование действий и декомпозицию зависимостей для упрощения сложных пространств действий [29], интеграцию методов Monte-Carlo с нейросетями для обработки несовершенной информации [30]. Эти исследования демонстрируют, что игровые среды предоставляют широкий пул реалистичных задач для развития ИИ-агентов.

Направление исследований о*бучение с ИИ-агентами* рассматривает, как ИИ-агенты могут трансформировать образовательные и социальные экосистемы, фокусируясь на повышении цифровой грамотности и преодолении барьеров в обучении. Например, педагогические ИИ-агенты разрабатываются для решения проблем генеративного ИИ в образовании, предлагая структурированные подходы к проектированию учебных процессов, включая персонализацию и адаптацию под нужды учащихся [31]. В онлайн-обучении ИИ-агенты минимизируют социальную изоляцию, улучшая взаимодействие между студентами и предлагая этически продуманные решения для поддержки социальных связей [4]. Рекомендательные системы на базе ИИ позволяют анализировать предпочтения учащихся для подбора курсов и формирования сообществ по интересам, улучшая вовлеченность [32].

Направление *ИИ-усиленная креативность и генерация идей* направленно на интеграцию искусственного интеллекта в творческие процессы для расширения человеческого потенциала в генерации инновационных решений, нарративов и дизайна. Ключевой проблемой является преодоление линейного подхода традиционных ИИ-инструментов, которые часто не учитывают нелинейную природу творчества, требующую итеративного исследования, рефлексии и ремикса идей [33]. Исследования фокусируются на разработке ко-креативных систем, где ИИ выступает не как исполнитель, а как равноправный участник, способный генерировать контент (текст, изображения, сценарии) на основе семиотического анализа, пользовательских данных или мультимодальных входов [34]. В маркетинге ИИ агенты могут использоваться для разработки креативных стратегий на основе анализа исторических кампаний и прогноза кликабельность контента [35].

Направление *AI-агенты в автоматизации разработки ПО* фокусируется на интеграции ИИ в процессы разработки и обеспечения качества программного обеспечения (ПО) для автоматизации тестирования, отладки и анализа кода. Современные подходы включают семантические модели для стандартизации взаимодействия между агентами в распределенных средах, что упрощает координацию и обмен данными [36]. Методы охватывают полный цикл разработки: от прогнозирования уязвимостей и генерации тестов до автоматического исправления кода [37]. Например, ИИ-агенты используются для оценки метрик качества в аспектно-ориентированной разработке, демонстрируя улучшение эволюционируемости и повторного использования кода [38].

Последняя, четвертая, группа направлений объединяет темы обеспечения доверия, интерпретируемости и соответствия этическим нормам и составляет 17,1% выборки.

Доверие и взаимодействие в командах «человек – ИИ» – это направление исследований, фокусирующееся на оптимизации кооперации между людьми и ИИ-агентами через управление доверием, прозрачность и адаптацию поведенческих стратегий. Исследования демонстрируют, что ключевым фактором успешного взаимодействия является калибровка доверия, достигаемая за счет объяснений, подчеркивающих честность и прозрачность работы ИИ [6]. Например, в автономных системах, таких как самоуправляемые автомобили, ошибки ИИ на ранних этапах взаимодействия критически снижают доверие пользователей, что требует разработки механизмов восстановления лояльности [39]. Исследования, которые изучают оптимальную кооперацию между людьми и ИИ показывают, что наилучшие результаты достигаются при смешанных режимах взаимодействия, сочетающих автономию ИИ с человеческим контролем [40].

Направление *этические и моральные аспекты AI-агентов* изучает влияние искусственного интеллекта на социальные нормы, восприятие ответственности и формирование ценностных ориентиров в человеко-машинном взаимодействии. Ключевые проблемы включают антропоморфиза-

цию ИИ, которая приводит к искаженному восприятию его возможностей: пользователи склонны переоценивать свой вклад при совместной работе с ИИ, игнорируя его роль («эффект призрачного автора»), или приписывать агентам человеческие эмоции, особенно при наличии антропоморфных черт [41]. Смещения в обучающих данных усиливают риски дискриминации, актуализируя пересмотр подходов к проектированию «рациональных агентов» [42]. Исследования нарушений моральных границ ИИ-агентами раскрывают нюансы общественного восприятия технологий [5].

Объяснимые ИИ-системы и интерпретация решений – это направление исследований, направленное на повышение прозрачности ИИ через интеграцию символических методов, причинного анализа и нейро-символьных подходов. Для преодоления проблемы «черного ящика» в нейросетях разрабатываются методы, связывающие действия агентов с интерпретируемыми онтологиями [43] и алгоритмы генерации объяснений через сравнение с ожидаемым поведением [44]. Подходы включают причинно-следственные модели для объяснения решений в условиях неопределенности и нейро-символьные архитектуры, комбинирующие онтологии с нейросетями [43].

3.2. Классификация ИИ-агентов

Современные классификации ИИ-агентов все чаще рассматривают агентность не как принадлежность системы к фиксированному типу программ, а как совокупность архитектурных, функциональных и социотехнических характеристик. В отличие от ранних типологий, ориентированных преимущественно на автономность, реактивность или прикладную роль агента, современные подходы смещают фокус на то, как агентная система воспринимает среду, формирует цели, планирует действия, использует память и инструменты, получает обратную связь и координирует выполнение задач. В литературе об LLM-агентах ключевыми измерениями становятся память, планирование, использование инструментов, рефлексия, обучение на обратной связи и способность действовать в цифровой или физической среде [45, 46]. В многоагентных системах классификационными основаниями выступают роли агентов, иерархия, коммуникационные протоколы, распределение задач и механизмы координации [47–49]. В работах, ориентированных на управление и регулирование, дополнительно выделяются уровень автономии, сложность целей, универсальность, риски и механизмы человеческого контроля [50, 51]. Таким образом, классификации ИИ-агентов целесообразно рассматривать как взаимодополняющие аналитические рамки, описывающие не только тип системы, но и способ организации агентности.

Проведенный обзор литературы позволяет предложить функционально-социотехническую классификацию ИИ-агентов, включающую три ключевых класса: 1) разговорные и LLM-агенты – чат-боты, ассистенты и агенты на основе больших языковых моделей; 2) мультимодальные и воплощенные агенты – системы, работающие с текстом, изображениями, речью, сенсорными данными и физической средой; 3) адаптивные обучающиеся агенты – агенты на основе RL, непрерывного обучения и обучения на протяжении жизненного цикла.

При этом доверие, интерпретируемость, безопасность, этика, подотчетность и взаимодействие в командах «человек – ИИ» не образуют отдельный класс агентов, а выступают сквозными социотехническими характеристиками, применимыми ко всем типам агентных систем. С другой стороны, часть исследований фокусируется на области применения – образование, игры, креативность, научные исследования и разработка программного обеспечения.

3.3. Развитие направлений исследований

В то время как в целом количество публикаций, посвященных тематике ИИ-агентов, быстро растет в последние два десятилетия, выделенные исследовательские направления развиваются неравномерно. Наибольшее по доле публикаций направление «ИИ-агенты в игровых средах» в отдельные годы занимает около 90% всех публикаций (*рис. 1*). Пиковые значения доли публикаций за период 2007–2016 годов, но позже наблюдается выраженная нисходящая тенденция, связанная с активным развитием других направлений.

Остальные исследовательские направления имеют более схожую динамику (*рис. 2*). Каждый график отражает долю публикаций по каждому направлению в общем количестве публикаций по тематике ИИ-агентов за период с 2014 по 2025 год. Ряд направлений демонстрирует умеренный, но устой-

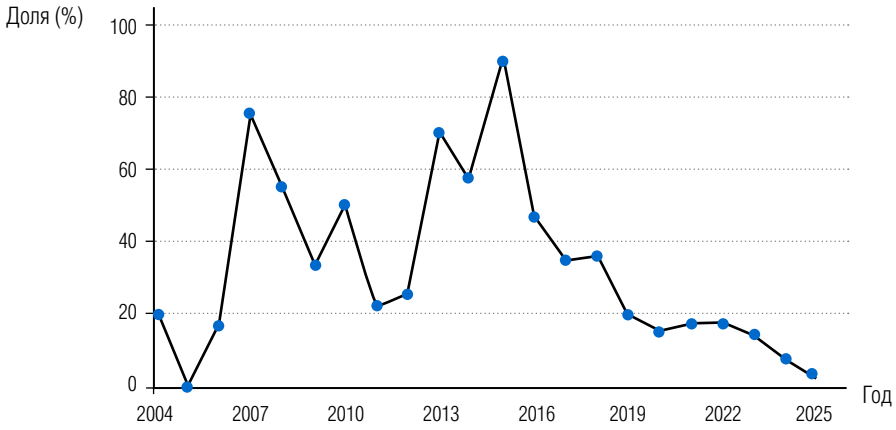


Рис. 1. Динамика развития направлений исследований по доле публикаций – направление «ИИ-агенты в игровых средах».

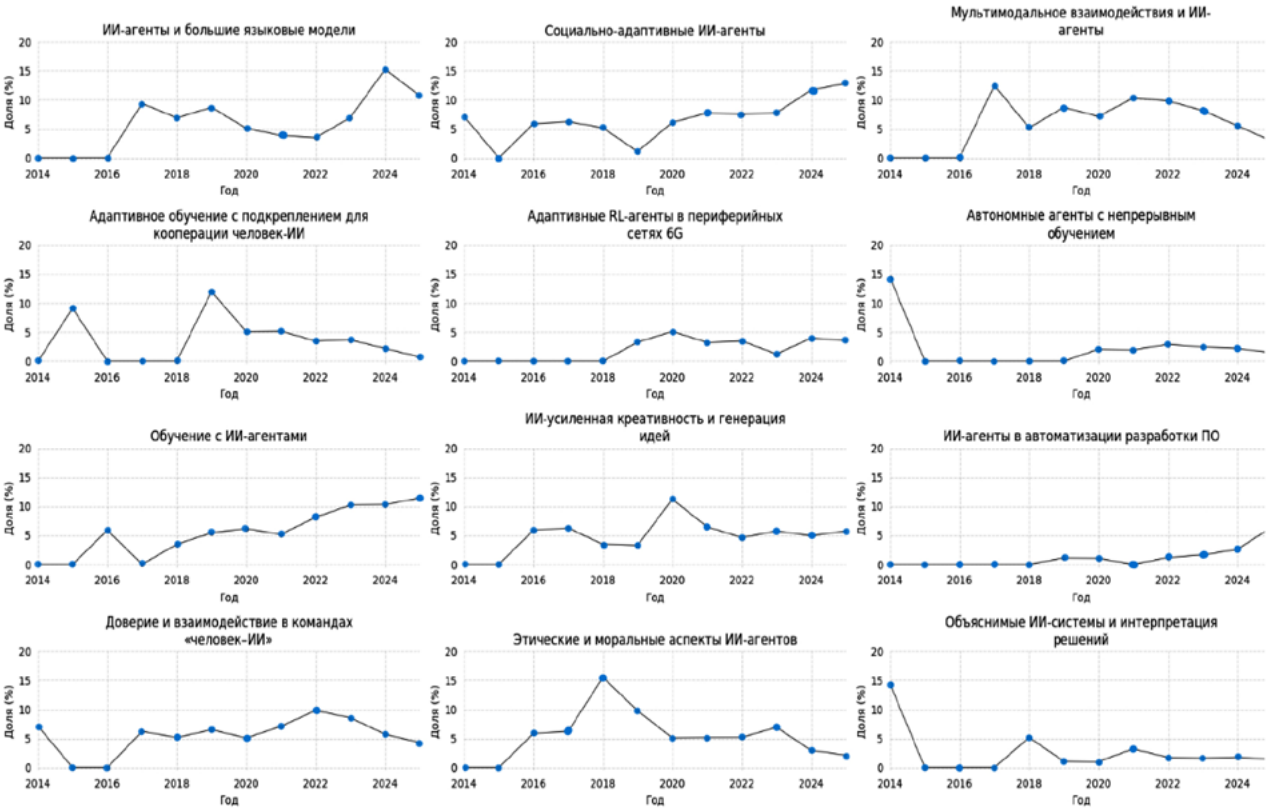


Рис. 2. Динамика развития направлений исследований на основе доли публикаций.

чивый рост интереса со стороны научного сообщества в последние годы. В частности, направление, связанное с ИИ-агентами и большими языковыми моделями, показывает увеличение доли публикаций начиная с 2023 года. Аналогичный рост наблюдается для тем «Социально-адаптивные ИИ-агенты», «Обучение с ИИ-агентами» и «ИИ-агенты в автоматизации разработки ПО».

Некоторые направления характеризуются краткосрочными пиками популярности. К ним можно отнести темы мультимодального взаимодействия и ИИ-агентов, адаптивного обучения с подкреплением для кооперации человек – ИИ, усиленной креативности и генерации идей, а также этических и моральных аспектов ИИ-агентов. Однако, к ряду направлений интерес к остается на

относительно стабильном, но относительно низком, уровне на протяжении всего анализируемого периода. Среди них можно выделить направления исследований в области доверия и взаимодействия в командах «человек – ИИ», адаптивных RL-агентов в периферийных сетях 6G.

3.4. География ключевых исследований

Технология ИИ-агентов получила различное внимание со стороны исследователей по странам (*рис. 3*). Анализ доли исследователей по странам на основе их аффилиации демонстрирует доминирующую роль США практически во всех исследуемых направлениях. Особенно высокий вклад США отмечается в таких направлениях, как «Автономные агенты с непрерывным обучением», «Объяснимые ИИ-системы и интерпретация решений», а также «Адаптивное обучение с подкреплением для кооперации человек – ИИ». Китай занимает вторую позицию по количеству активных направлений, особенно проявляя себя в направлениях, связанных с взаимодействием и коммуникацией ИИ-агентов: «Мультимодальное взаимодействие и ИИ-агенты», «Социально-адаптивные ИИ-агенты», «ИИ-агенты и большие языковые модели» – а также в теме «RL-агенты в периферийных сетях 6G». Великобритания занимает третье место по вкладу в исследования по теме ИИ-агентов, при этом наибольшая активность приходится на направление адаптивного обучения с подкреплением для кооперации человек – ИИ. Индия находится на четвертой позиции, преимущественно фокусируясь на теме «Адаптивные RL-агенты в периферийных сетях 6G». Южная Корея замыкает пятерку, выделяясь исследованиями в области социально-адаптивных ИИ-агентов. Остальные страны, в том числе Россия, имеют сравнительно низкую представленность публикаций в международных изданиях и конференциях и не имеют выделяющихся направлений исследований.

В период с 2014 по 2025 год США сохраняют лидерство с пиком в 50% публикаций в 2015 году, однако в последние годы доля публикаций немного снижается. В то же время наблюдается явная тенденция роста доли исследований авторов из Китая. Также интересно отметить пик в 20% доли исследований Великобритании, приходящийся на 2016–2017 годы. Остальные страны демонстрируют сравнительно низкую долю публикаций без четких тенденций.

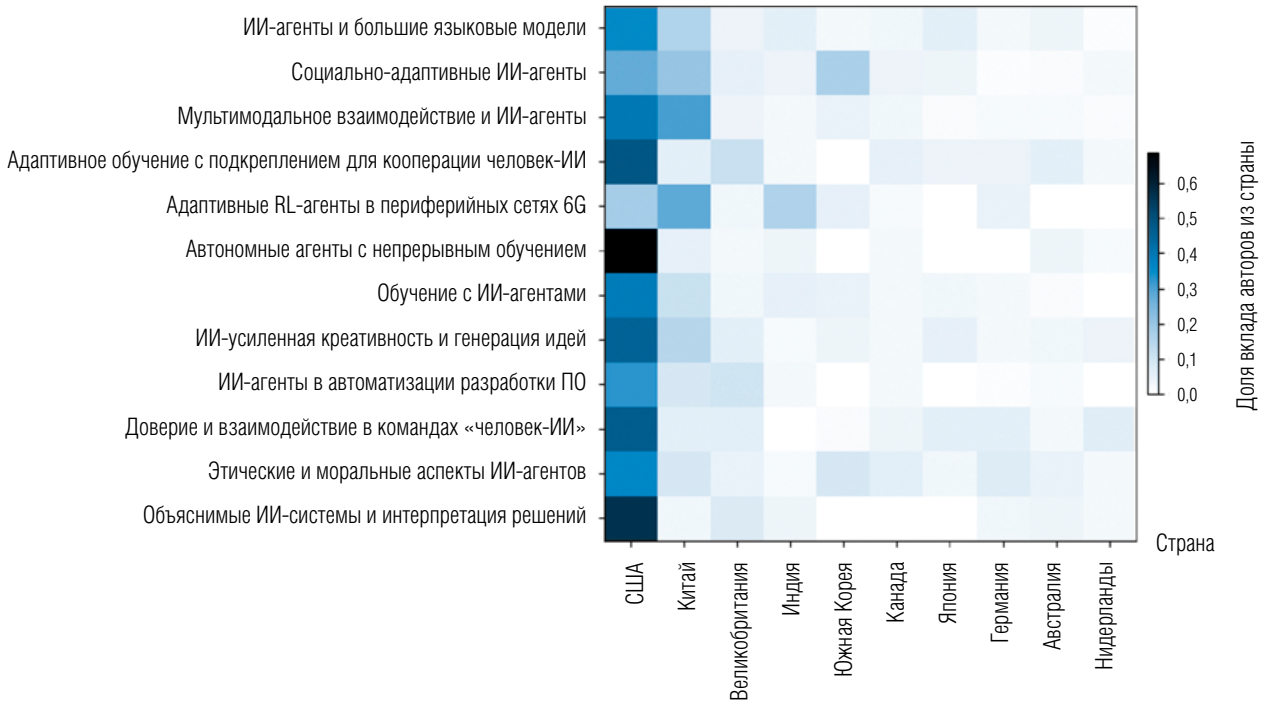


Рис. 3. Распределение направлений исследований по странам.

3.5. Цитируемость направлений исследований

Далее проведен анализ академического вклада каждого из выделенных направлений исследований на основе показателя цитируемости публикаций и нормированной цитируемости публикаций, рассчитанной как отношение количества цитирований статьи к количеству лет с даты публикации (*табл. 2*).

Наибольшее академическое влияние наблюдается у направлений, связанных с взаимодействием и коммуникацией ИИ-агентов, в особенности у направлений «Социально-адаптивные ИИ-агенты» и «Мультимодальное взаимодействие и ИИ-агенты». В среднем публикации в этих направлениях ежегодно получают 4,41 и 3,46 цитирований соответственно. В направлении «Социально-адаптивные ИИ-агенты» по цитируемости можно выделить такие работы как систематизированный обзор [52], посвященный факторам принятия ИИ, а также систематизированный обзор [2], рассматривающий применение ИИ в сфере услуг и индустрии гостеприимства. Наименьшие значения метрик наблюдаются у направления «ИИ-агенты в автоматизации разработки ПО», что может быть связано с относительно небольшой представленностью данного направления и низкой взаимосвязанностью исследований в рамках направления. Тем не менее, существенная доля работ направления опубликована в 2024–2025 годах, что говорит об актуальности данного направления исследований.

Таблица 2.

Цитируемость направлений исследований

Направление	Средняя цитируемость публикаций	Средняя нормированная цитируемость публикаций	Максимальная нормированная цитируемость публикаций
Взаимодействие и коммуникация ИИ-агентов			
ИИ-агенты и большие языковые модели	4,09	1,10	21,33
Социально-адаптивные ИИ-агенты	17,28	4,41	101,00
Мультимодальное взаимодействие и ИИ-агенты	19,79	3,46	62,44
Обучаемость и адаптивность ИИ-агентов			
Адаптивное обучение с подкреплением для кооперации человек – ИИ	10,26	1,84	10,83
Адаптивные RL-агенты в периферийных сетях 6G	10,10	2,07	21,29
Автономные агенты с непрерывным обучением	6,91	1,48	9,33
Прикладное применение ИИ-агентов			
ИИ-агенты в игровых средах	9,74	1,37	42,17
Обучение с ИИ-агентами	8,30	1,92	66,17
ИИ-усиленная креативность и генерация идей	7,63	1,51	27,50
ИИ-агенты в автоматизации разработки ПО	1,31	0,31	3,33
Этика и доверие к ИИ-агентам			
Доверие и взаимодействие в командах «человек – ИИ»	10,06	2,27	18,00
Этические и моральные аспекты ИИ-агентов	12,51	2,37	24,00
Объяснимые ИИ-системы и интерпретация решений	7,47	1,24	16,60

3.6. Насыщенные, перспективные и формирующиеся предметные области исследований ИИ-агентов

Чтобы конкретизировать рекомендации и перспективы исследований, целесообразно дополнительно разделить выявленные направления по степени насыщенности и динамике роста. Для этого были использованы четыре метрики: (1) общее число публикаций по теме, (2) доля темы в текущем потоке публикаций за 2024–2025 гг., (3) доля публикаций 2022–2025 гг. в общем массиве работ по теме и (4) изменение средней доли темы в общем потоке публикаций между периодами 2019–2021 и 2024–2025 гг. Дополнительно учитывалась средняя нормированная цитируемость как индикатор академического влияния. Такое разбиение позволяет отделить действительно формирующиеся предметные области от быстро растущих, но уже высококонкурентных направлений.

В логике дальнейшей интерпретации под перегретыми понимаются темы, которые одновременно обладают большим накопленным объемом публикаций, высокой долей в текущем массиве и положительным приростом доли. Формирующимися считаются темы с пока еще умеренным абсолютным объемом, но высокой концентрацией публикаций в последние годы и положительным приростом. Наконец, зрелые и снижающиеся темы характеризуются значительным историческим объемом, но отрицательной динамикой доли в текущем публикационном потоке.

Приведенные результаты показывают, что в текущем публикационном потоке доминируют три направления: ИИ-агенты и большие языковые модели, социально-адаптивные ИИ-агенты и обучение с ИИ-агентами. В совокупности на них приходится 49,5% всех публикаций 2024–2025 гг. При этом каждая из этих тем демонстрирует резкий положительный прирост доли относительно периода 2019–2021 гг.: от 8,24 до 10,91 п.п. Это позволяет рассматривать их как высококонкурентные и в определенной степени перегретые области. Следовательно, публикационная стратегия в данных темах имеет смысл прежде всего при наличии узкой исследовательской новизны: новых данных, сильного прикладного контекста, оригинального протокола оценки или методологического вклада. Простое расширение уже сложившейся повестки в этих предметных областях, вероятно, будет иметь более низкую предельную научную отдачу.

Иная картина наблюдается в исторически крупных, но теряющих относительную долю направлениях. Наиболее показателен кластер исследований ИИ-агентов в игровых средах: при максимальном накопленном объеме публикаций (258 работ) его доля в текущем потоке составляет лишь 8,4%, а изменение доли относительно 2019–2021 гг. равно −16,00 п.п. Схожий, хотя и менее резкий, нисходящий профиль наблюдается у мультимодального взаимодействия, этических аспектов и адаптивного обучения с подкреплением для кооперации человек – ИИ. Эти направления нельзя считать исчерпанными, однако новые публикации в них особенно нуждаются в переосмыслении исследовательской рамки; воспроизведение уже освоенных постановок вряд ли будет столь же востребовано, как несколько лет назад.

С точки зрения будущего спроса на публикации наиболее интересны темы, которые еще не достигли высокой насыщенности, но уже демонстрируют признаки ускоренного формирования. В первую очередь к ним относятся ИИ-агенты в автоматизации разработки ПО и автономные агенты с непрерывным обучением. Для первой темы 80,0% всех публикаций приходится на 2022–2025 гг., а прирост доли в текущем потоке относительно 2019–2021 гг. составляет 5,67 п.п. Это означает, что область быстро кристаллизуется, но пока не обладает критической массой накопленной литературы, характерной для перегретых предметных областей. Для непрерывного обучения сигнал слабее, однако также заметен: 75,0% публикаций сосредоточены в 2022–2025 гг., а доля темы в текущем потоке остается положительной. Именно такие предметные области представляются наиболее перспективными для новых исследований, поскольку сочетают актуальность, еще не полностью занятую тематическую нишу и потенциал для формирования собственных подповесток.

Отдельно следует отметить промежуточную группу направлений, в которую входят доверие в командах «человек – ИИ», креативные приложения, RL-агенты для 6G и объяснимые ИИ-системы. Эти темы не демонстрируют ни взрывного роста, ни явного структурного спада. Они сохраняют устойчивое присутствие в литературе и могут быть продуктивными в случае точного позиционирования работы на стыке предметных областей, например при переносе агентных подходов в высокорисковые прикладные контексты, инфраструктурные

Таблица 3.

Классификация направлений исследований ИИ-агентов по насыщенности и динамике

Направление	Общее число публикаций	Публикации 2024–2025 гг.	Доля в потоке 2024–2025 гг., %	Доля публикаций 2022–2025 гг. в массиве темы, %	Изменение доли к 2019–2021 гг., п.п.	Средняя нормированная цитируемость	Статус
ИИ-агенты и большие языковые модели	144	92	19,2	79,9	10,59	1,10	Перегретое / высококонкурентное
Социально-адаптивные ИИ-агенты	136	77	16,1	80,1	10,91	4,41	Перегретое / высококонкурентное
Обучение с ИИ-агентами	134	68	14,2	79,9	8,24	1,92	Перегретое / высококонкурентное
ИИ-агенты в игровых средах	258	40	8,4	41,5	–16,00	1,37	Зрелое / снижающееся
Мультимодальное взаимодействие и ИИ-агенты	107	32	6,7	64,5	–5,44	3,46	Зрелое / снижающееся
Этические и моральные аспекты ИИ-агентов	79	18	3,8	55,7	–4,97	2,37	Зрелое / снижающееся
Адаптивное обучение с подкреплением для кооперации человек – ИИ	53	12	2,5	50,9	–7,48	1,84	Зрелое / снижающееся
ИИ-агенты в автоматизации разработки ПО	35	22	4,6	80,0	5,67	0,31	Формирующееся
Автономные агенты с непрерывным обучением	32	13	2,7	75,0	0,77	1,48	Формирующееся
Доверие и взаимодействие в командах «человек – ИИ»	104	35	7,3	70,2	–1,02	2,27	Стабильное промежуточное
ИИ-усиленная креативность и генерация идей	84	33	6,9	65,5	–1,52	1,51	Стабильное промежуточное
Адаптивные RL-агенты в периферийных сетях 6G	48	25	5,2	70,8	0,30	2,07	Стабильное промежуточное
Объяснимые ИИ-системы и интерпретация решений	32	11	2,3	56,2	–0,05	1,24	Стабильное промежуточное

системы или сценарии длительного взаимодействия человека и агента.

Наконец, сама структура данных показывает, что наиболее свежие и острые вопросы лишь частично попадают в устойчивые тематические кластеры. Даже после объединения публикаций 2024 и 2025 гг. многие новые сюжеты еще не успели оформиться в отдельные направления и, по-видимому, остаются встроенными в более широкие предметные области, прежде всего связанные с LLM-агентами и автоматизацией разработки ПО. Поэтому текущий библиометрический срез, с одной стороны, уже фиксирует ранние сигналы новых направлений, а с другой стороны, по-прежнему систематически недооценивает самые новые исследовательские повестки. Именно по этой причине наиболее оправданной стратегией для последующих публикаций представляется не вход в максимально насыщенные темы, а работа в быстро формирующихся предметных областях, где траектория роста уже различима, но пространство для оригинального вклада еще сохраняется.

Заключение

Проведенный систематизированный обзор позволил на основе количественных методов отразить современную картину исследований об автономных ИИ-агентах. С помощью тематического моделирования на основе BERTopic выделено тринадцать тематических направлений, сгруппированных в четыре укрупненные предметные области: взаимодействие и коммуникация ИИ-агентов, прикладное применение ИИ-агентов, этика и доверие к ИИ-агентам, обучаемость и адаптивность ИИ-агентов. Результаты тематического моделирования показывают, что около половины работ сегодня сосредоточено на практическом применении агентов, тогда как ранее доминировала тематика игровых сред. В последние годы наблюдается заметный сдвиг интереса в сторону больших языковых моделей и мультимодальных систем, что отражает общую эволюцию технологий ИИ. Анализ показал, что лидируют исследования, посвященные взаимодействию человека и агента: такие публикации получают наибольшее среднегодовое число цитирований. Также отметим стремительный рост исследований LLM-агентов в 2022–2024 гг., что отражает трансформацию области под влиянием крупных языковых моделей. Географическое распределение подтверждает доминирование США при быстро растущем вкладе Китая и существенной доле Великобритании, Индии и Южной Кореи в отдельных направлениях, в то время как доля других стран, в том числе России, остается довольно низкой.

Несмотря на значительный масштаб выборки (1634 публикации) и использование подхода тематического моделирования, исследование имеет ряд ограничений. Часть из них связана с составом собранного корпуса.

Во-первых, эмпирическая база исследования ограничена публикациями, индексируемыми в Scopus. С одной стороны, это позволило включить в анализ статьи и материалы конференций, для которых доступны данные о цитируемости, и тем самым учитывать не только количественную динамику публикаций, но и академическую видимость и влияние работ. С другой стороны, часть релевантных публикаций из Web of Science, IEEE Xplore, национальных репозиториев и специализированных конференционных серий могла остаться за пределами анализа; вследствие этого представленность отдельных направлений, языковых сегментов, региональных научных дискуссий и конференционных площадок может быть занижена.

Во-вторых, в корпус не вошли монографии, книги, учебные и практико-ориентированные издания. Они важны для прикладного и концептуального осмысления темы, включая вопросы агентных паттернов проектирования, создания и внедрения ИИ-агентов и их использования в бизнес-трансформации [53, 54]. Однако из-за более длительного цикла подготовки такие источники фиксируют подходы и практики с существенным временным лагом относительно момента их появления в академической дискуссии, тогда как статьи и особенно материалы конференций позволяют своевременно отследить новые исследовательские вопросы, термины и методы.

В-третьих, результаты данного обзора отражают картину, характерную для англоязычной академической литературы, индексируемой в базе Scopus. Включение в анализ публикаций на других языках может привести к уточнению структуры тематических кластеров и выявлению новых направлений. Так, обзор отечественных публикаций по базе научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, показал, что в России активно развиваются прикладные исследования в области использования ИИ-агентов. Наиболее часто рассматриваются вопросы применения агентных технологий в образовании [55, 56], корпоративном управлении и проектной деятельности [57]. Отдельные работы затрагивают философские и этические аспекты взаимодействия человека и ИИ [58].

Методологические ограничения исследования заключаются в следующем. Во-первых, анализ опирался лишь на заголовки и аннотации, что повышает чувствительность к терминологическим вариациям и, возможно, не отражает полноту содержательных нюансов статей. В-вторых, тематическое моделирование неизбежно зависит от выбранных гиперпараметров и исследовательских решений при интерпретации кластеров. Наконец, цитируемость как показатель влияния подвержена возрастному и дисциплинарному смещению: более ранние или «мейнстримные» темы получают преимущество перед новыми узкими областями.

С учетом указанных ограничений можно сформулировать несколько направлений дальнейших исследований. Имеет смысл расширить корпус за счет многоязычных источников и полнотекстового анализа, что повысит семантическую точность и позволит выявить региональные особенности дискурса. Перспективны следующие направления исследований: изучение координации гетерогенных агентов

в условиях ограниченных ресурсов и неопределенности, разработка метрик для оценки последствий массового внедрения агентных систем, исследования доверия и этики в системах «человек – агент», использование ИИ для малоресурсных языков. ■

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-18-00539, https://rscf.ru/project/25-18-00539/.

Литература

1. Sapkota R., Roumeliotis K. I., Karkee M. AI Agents vs. Agentic AI: A conceptual taxonomy, applications and challenges // Information Fusion. 2026. Vol. 126, Part B. Art. 103599. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103599
2. Chi O. H., Denton G., Gursoy D. Artificially intelligent device use in service delivery: a systematic review, synthesis, and research agenda // Journal of Hospitality Marketing & Management. 2020. Vol. 29. No. 7. P. 757–786. https://doi.org/10.1080/19368623.2020.1721394
3. Ferrag M. A., Tihanyi N., Debbah M. From LLM reasoning to autonomous AI agents: A comprehensive review // arXiv:2504.19678. 2025. https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.19678
4. Wang Q., Jing S., Goel A. K. Co-designing AI agents to support social connectedness among online learners: functionalities, social characteristics, and ethical challenges // Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference (DIS '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2022. P. 541–556. https://doi.org/10.1145/3532106.3533534
5. Hong J.-W., Sukyoung C., Williams D. Sexist AI: An experiment integrating CASA and ELM // International Journal of Human–Computer Interaction. 2020. Vol. 36. No. 20. P. 1928–1941. https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1801226
6. Integrity-based explanations for fostering appropriate trust in AI agents / S. Mehrotra [et al.] // ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems. 2024. Vol. 14. No. 1. Art. 4. https://doi.org/10.1145/3610578
7. Душкин Р. В. Развитие методов адаптивного обучения при помощи использования интеллектуальных агентов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 1. С. 87–96. https://doi.org/10.14357/20718594190108
8. Grootendorst M. BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure // arXiv:2203.05794. 2022. https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.05794
9. Galli C., Donos N., Calciolari E. Performance of 4 pre-trained sentence transformer models in the semantic query of a systematic review dataset on peri-implantitis // Information. 2024. Vol. 15. No. 2. Art. 68. https://doi.org/10.3390/info15020068
10. Feedback-based self-learning in large-scale conversational AI agents / P. Ponnusamy [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 34. No. 08. P. 13180–13187. https://doi.org/10.1609/aaai.v34i08.7022
11. ProAgent: Building proactive cooperative agents with large language models / C. Zhang [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2024. Vol. 38. No. 16. P. 17591–17599. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i16.29710
12. Mari A., Mandelli A., Algesheimer R. Empathic voice assistants: Enhancing consumer responses in voice commerce // Journal of Business Research. 2024. Vol. 175. Art. 114566. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114566
13. Choi S., Zhou J. Inducing consumers' self-disclosure through the fit between Chatbot's interaction styles and regulatory focus // Journal of Business Research. 2023. Vol. 166. Art. 114127. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114127
14. Park S., Choi W. J., Shin D. Who makes you more disappointed? The effect of avatar presentation, company market status, and agent identity on customers' perceived service quality and satisfaction of online chatting services // Asia Marketing Journal. 2021. Vol. 23. No. 3. Art. 4. https://doi.org/10.53728/2765-6500.1577
15. Wu S., Fei H., Qu L., Ji W., Chua T.-S. NExT-GPT: Any-to-Any Multimodal LLM // arXiv:2309.05519. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05519
16. Nguyen V.-Q., Suganuma M., Okatani T. Look wide and interpret twice: Improving performance on interactive instruction-following tasks // Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence Main Track. P. 923–930. https://doi.org/10.24963/ijcai.2021/128
17. Wang H., Liang W., Gool L. V., Wang W. DREAMWALKER: Mental planning for continuous vision-language navigation // arXiv:2308.07498. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07498
18. Zand J., Parker-Holder J., Roberts S. J. On-the-fly strategy adaptation for ad-hoc agent coordination // arXiv:2203.08015. 2022. https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.08015
19. Tackling cooperative incompatibility for zero-shot Human-AI coordination / Y. Li [et al.] // Journal of Artificial Intelligence Research. 2024. Vol. 80. P. 1139–1185. https://doi.org/10.1613/jair.1.15884
20. Hong J., Levine S., Dragan A. Learning to influence human behavior with offline reinforcement learning // Advances in Neural Information Processing Systems. 2023. Vol. 36. P. 36094–36105. https://doi.org/10.52202/075280-1565
21. Learning from active human involvement through proxy value propagation / Z. Peng (Mark) [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2023. Vol. 36. P. 77969–77992.
22. When large language model agents meet 6G networks: perception, grounding, and alignment / M. Xu [et al.] // IEEE Wireless Communications. 2024. Vol. 31, No. 6. P. 63–71. https://doi.org/10.1109/MWC.005.2400019

23. AI service deployment and resource allocation optimization based on human-like networking architecture / Y. Hu [et al.] // IEEE Internet of Things Journal. 2024. Vol. 11. No. 14. P. 24795–24813. https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3384546

24. Learning-based image analytics in User–AI agent interactions for cyber-enabled manufacturing / M. L. Alarcon [et al.] // 2024 IEEE 4th International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS). IEEE, 2024. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/ICHMS59971.2024.10555867

25. Goal-oriented and semantic communication in 6G AI-native networks: The 6G-GOALS approach / E. C. Strinati [et al.] // 2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). IEEE, 2024. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597087

26. Ayub A., Wagner A. R. CBCL-PR: A cognitively inspired model for class-incremental learning in robotics // IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems. 2023. Vol. 15. No. 4. P. 2004–2013. https://doi.org/10.1109/TCDS.2023.3299755

27. Generative teaching networks: Accelerating neural architecture search by learning to generate synthetic training data / F. P. Such [et al.] // Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. PMLR, 2020. P. 9206–9216.

28. Towards playing full MOBA games with deep reinforcement learning / D. Ye [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 621–632.

29. Mastering complex control in MOBA games with deep reinforcement learning / D. Ye [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 34. No. 04. P. 6672–6679. https://doi.org/10.1609/aaai.v34i04.6144

30. DouZero: Mastering DouDizhu with self-play deep reinforcement learning / D. Zha [et al.] // Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning. PMLR, 2021. P. 12333–12344.

31. Lan Y.-J., Chen N.-S. Teachers' agency in the era of LLM and generative AI: Designing pedagogical AI agents // Educational Technology & Society. 2024. Vol. 27. No. 1. P. 1–18. https://doi.org/10.30191/ETS.202401_27(1).PP01

32. Abhinav K., Subramanian V., Dubey A. LeCoRe: A framework for modeling learner's preference // Proceedings of the 11th International Conference on Educational Data Mining. Buffalo, NY, USA, 2018.

33. An AI-powered approach to the semiotic reconstruction of narratives / E. S. de Lima [et al.] // Entertainment Computing. 2025. Vol. 52. Art. 100810. https://doi.org/10.1016/j.entcom.2024.100810

34. Pixelor / A. K. Bhunia [et al.] // ACM Transactions on Graphics. 2020. Vol. 39. No. 6. P. 1–15.

35. Sinha M., Healey J., Sengupta T. Designing with AI for digital marketing // Adjunct Publication of the 28th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization (UMAP '20). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. P. 65–70. https://doi.org/10.1145/3386392.3397600

36. Tara A., Taban N., Turesson H. Performance analysis of an ontology model enabling interoperability of artificial intelligence agents // Artificial Intelligence Trends in Systems. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 395–406. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09076-9_35

37. Kalech M., Stern R. AI for software quality assurance blue sky ideas talk // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 34. No. 9. P. 13529–13533. https://doi.org/10.1609/aaai.v34i09.7076

38. Senthil Velan S. Introducing artificial intelligence agents to the empirical measurement of design properties for aspect oriented software development // 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence (AICAI). IEEE, 2019. P. 80–85. https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701250

39. Xu J., Howard A. M. How much do you trust your self-driving car? Exploring human-robot trust in high-risk scenarios // 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2020. P. 4273–4280. https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9282866

40. Fuchs A., Passarella A., Conti M. A cognitive framework for delegation between error-prone AI and human agents // 2022 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP). IEEE, 2022. P. 317–322. https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP55677.2022.00074

41. Skulmowski A. Placebo or assistant? Generative AI between externalization and anthropomorphization // Educational Psychology Review. 2024. Vol. 36. No. 2. Art. 58. https://doi.org/10.1007/s10648-024-09894-x

42. Vetrò A., Santangelo A., Beretta E., De Martin J. C. AI: from rational agents to socially responsible agents // Digital Policy, Regulation and Governance. 2019. Vol. 21. No. 3. P. 291–304. https://doi.org/10.1108/DPRG-08-2018-0049

43. Shilov N. G., Ponomarev A. V., Smirnov A. V. The analysis of ontology-based neuro-symbolic intelligence methods for collaborative decision support // Informatics and Automation. 2023. Vol. 22. No. 3. P. 576–615.

44. Explicable planning as minimizing distance from expected behavior / A. Kulkarni [et al.] // Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS'19). Montreal, QC, Canada, 2019. P. 774–782.

45. The rise and potential of large language model based agents: A survey / Z. Xi [et al.] // arXiv:2309.07864. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.07864

46. A review of prominent paradigms for LLM-based agents: Tool use, planning (including RAG), and feedback learning / X. Li [et al.] // Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024). 2024. P. 9760–9779.

47. Händler T. Balancing autonomy and alignment: A multi-dimensional taxonomy for autonomous LLM-powered multi-agent architectures // arXiv.2310.03659. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.03659

48. A survey on LLM-based multi-agent systems: Workflow, infrastructure, and challenges / X. Li [et al.] // Vicinagearth. 2024. Vol. 1. Art. 9. https://doi.org/10.1007/s44336-024-00009-2

49. Masterman T., Besen S., Sawtell M., Chao A. The landscape of emerging AI agent architectures for reasoning, planning, and tool calling: A survey // arXiv:2404.11584. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.11584

50. Kasirzadeh A., Gabriel I. Characterizing AI agents for alignment and governance // arXiv:2504.21848. 2025. https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.21848

51. A taxonomy of architecture options for foundation model-based agents: Analysis and decision model / J. Zhou [et al.] // arXiv:2408.02920. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02920

52. Kelly S., Kaye S.-A., Oviedo-Trespalacios O. What factors contribute to the acceptance of artificial intelligence? A systematic review // Telematics and Informatics. 2023. Vol. 77. Art. 101925. https://doi.org/10.1016/j.tele.2022.101925

53. Цзяншу Ю., Чжан С., Лян Х., Чжан Х., Ли Ю. Агенты искусственного интеллекта. Руководство по разработке. Москва: ДМК Пресс, 2025.

54. Борне П., Андерсон К., Вудс М., Димитрова Н. Агентный искусственный интеллект. Руководство по трансформации бизнеса. Москва: ДМК Пресс, 2025.

55. Глухов А. П. ИИ-агенты в тьюторстве: потенциал, вызовы и перспективы интеграции // Вестник педагогических инноваций. 2025. № 1(77). С. 65–74. https://doi.org/10.15293/1812-9463.2501.06

56. Берман Н. Д. Цифровой маркетинг: использование искусственного интеллекта для конкурентных стратегий // ЦИТИСЭ. 2025. № 2. С. 40-48.

57. Гузенко О. И., Балябин Д. С. ИИ-агенты в управлении проектами: возможности, ограничения и стратегии интеграции // Вестник проектного управления. 2025. Т. 1. № 2. С. 71–78.

58. Игнатьев В. И. И грядет «другой» актор... Становление техносубъекта в контексте движения к технологической сингулярности // Социология науки и технологий. 2019. Т. 10. № 1. С. 64–78. https://doi.org/10.24411/2079-0910-2019-10005

Об авторах

Юлия Николаевна Найденова

кандидат экономических наук;

заместитель заведующего лабораторией, Международная лаборатория экономики нематериальных активов, доцент, департамент экономики и финансов, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Пермь), Россия, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38;

Email: yunaydenova@hse.ru

ORCID: 0000-0002-5838-1331

Петр Андреевич Паршаков

кандидат экономических наук, PhD;

заведующий лабораторией, Международная лаборатория экономики нематериальных активов, профессор, департамент экономики и финансов, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Пермь), Россия, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38;

Email: pparshakov@hse.ru

ORCID: 0000-0002-1805-2680

Алексей Олегович Смирнов

стажер-исследователь, Международная лаборатория экономики нематериальных активов, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Пермь), Россия, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38;

Email: aosmirnov@hse.ru

ORCID: 0009-0005-9684-3217

Елена Анатольевна Шакина

кандидат экономических наук, PhD, MBA;

преподаватель, Университет Виго, Испания, 36310 Виго, Кампус Лагоас-Маркосенде;

Email: eshakina@hse.ru

ORCID: 0000-0003-4048-6132

Евгения Андреевна Шенкман
младший научный сотрудник, Международная лаборатория экономики нематериальных активов, старший преподаватель, департамент экономики и финансов, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Пермь), Россия, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38;
Email: shenkmanea@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9619-7674

Research on AI agents in economics and computer science: Thematic areas, dynamics, and prospects

Iuliia Nikolaevna Naidenova [a]
Email: yunaydenova@hse.ru

Petr Andreevich Parshakov [a]
Email: pparshakov@hse.ru

Aleksei Olegovich Smirnov [a]
Email: aosmirnov@hse.ru

Elena Anatolyevna Shakina [b]
Email: eshakina@hse.ru

Evgeniya Andreevna Shenkman [a]
Email: shenkmanea@gmail.com

[a] HSE University, Perm, Russia
[b] University of Vigo, Vigo, Spain

Abstract

This article presents a systematized review of academic publications on autonomous AI agents, based on the analysis of 1,634 works from international peer-reviewed journals indexed in the Scopus database. Using thematic modeling with contextualized embeddings via BERTopic, the study identifies key research directions on AI agents within computer science as well as their applications in the social sciences. Thirteen major thematic areas are distinguished and grouped into the following broader categories: interaction and communication of AI agents, applied use of AI agents, ethics and trust in AI agents, and the learnability and adaptability of AI agents. The review highlights a growing interest in the study of human-AI agent interaction and reveals a thematic evolution from formal planning models toward the integration of large language models and self-learning systems. The analysis also points to the dominance

of U.S.-based organizations in the volume of published research, alongside the rapid development of this field in China, with all other countries significantly lagging behind. The article concludes by outlining promising research directions, including the coordination of heterogeneous agents under uncertainty and the assessment of the socio-technical implications of their deployment.

Keywords: AI agents, systematic review, computer science, social sciences, topic modeling, BERTopic, research direction development, country-specific research trends

Citation: Naidenova, I. N., Parshakov, P. A., Smirnov, A. O., Shakina, E. A., & Shenkman, E. A. (2026). Research on AI agents in economics and computer science: Thematic areas, dynamics, and prospects *Business Informatics*, *20*(3), 47–68. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.47.68

References

1. Sapkota, R., Roumeliotis, K. I., & Karkee, M. (2026). AI Agents vs. Agentic AI: A conceptual taxonomy, applications and challenges. I*nformation Fusion, 126*(B), 103599. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103599
2. Chi, O. H., Denton, G., & Gursoy, D. (2020). Artificially intelligent device use in service delivery: A systematic review, synthesis, and research agenda. *Journal of Hospitality Marketing & Management, 29*(7), 757–786. https://doi.org/10.1080/19368623.2020.1721394
3. Ferrag, M. A., Tihanyi, N., & Debbah, M. (2025). From LLM reasoning to autonomous AI agents: A comprehensive review. *arXiv:2504.19678*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.19678
4. Wang, Q., Jing, S., & Goel, A. K. (2022). Co-designing AI agents to support social connectedness among online learners: Functionalities, social characteristics, and ethical challenges. *Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference*, 541–556. https://doi.org/10.1145/3532106.3533534
5. Hong, J.-W., Cho, S., & Williams, D. (2020). Sexist AI: An experiment integrating CASA and ELM. *International Journal of Human–Computer Interaction, 36*(20), 1928–1941. https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1801226
6. Mehrotra, S., Jorge, C. C., Jonker, C. M., & Tielman, M. L. (2024). Integrity-based explanations for fostering appropriate trust in AI agents. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 14(1), 4. https://doi.org/10.1145/3610578
7. Dushkin, R. V. (2019). Razvitiye metodov adaptivnogo obucheniya pri pomoshchi ispol'zovaniya intellektual'nykh agentov [Development of adaptive teaching methods using intelligent agents]. *Iskusstvenniy Intellekt i Prinyatie Resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], (1), 87–96 (in Russian). https://doi.org/10.14357/20718594190108
8. Grootendorst, M. (2022). BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure. *arXiv:2203.05794*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.05794
9. Galli, C., Donos, N., & Calciolari, E. (2024). Performance of 4 pre-trained sentence transformer models in the semantic query of a systematic review dataset on peri-implantitis. *Information, 15*(2), 68. https://doi.org/10.3390/info15020068
10. Ponnusamy, P., Roshan Ghias, A., Guo, C., & Sarikaya, R. (2020). Feedback-based self-learning in large-scale conversational AI agents. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 34*(08), 13180–13187. https://doi.org/10.1609/aaai.v34i08.7022
11. Zhang, C., Yang, K., Hu, S., Wang, Z., Li, G., Sun, Y., ... Yang, Y. (2024). ProAgent: Building proactive cooperative agents with large language models. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, *38*(16), 17591–17599. https://doi.org/10.1609/aaai.v38i16.29710
12. Mari, A., Mandelli, A., & Algesheimer, R. (2024). Empathic voice assistants: Enhancing consumer responses in voice commerce. *Journal of Business Research, 175*, 114566. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114566
13. Choi, S., & Zhou, J. (2023). Inducing consumers' self-disclosure through the fit between Chatbot's interaction styles and regulatory focus. *Journal of Business Research, 166*, 114127. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114127
14. Park, S., Choi, W. J., & Shin, D. (2021). Who makes you more disappointed? The effect of avatar presentation, company market status, and agent identity on customers' perceived service quality and satisfaction of online chatting services. *Asia Marketing Journal, 23*(3), 4. https://doi.org/10.53728/2765-6500.1577
15. Wu, S., Fei, H., Qu, L., Ji, W., & Chua, T.-S. (2023). NExT-GPT: Any-to-any multimodal LLM. *arXiv:2309.05519*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05519
16. Nguyen, V.-Q., Suganuma, M., & Okatani, T. (2021). Look wide and interpret twice: Improving performance on interactive instruction-following tasks. *Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21) Main Track* (pp. 923–930). https://doi.org/10.24963/ijcai.2021/128

17. Wang, H., Liang, W., Van Gool, L., & Wang, W. (2023). DREAMWALKER: Mental planning for continuous vision-language navigation. *arXiv:2308.07498*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07498

18. Zand, J., Parker-Holder, J., & Roberts, S. J. (2022). On-the-fly strategy adaptation for ad-hoc agent coordination. *arXiv:2203.08015*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.08015

19. Li, Y., Zhang, S., Sun, J., Zhang, W., Du, Y., Wen, Y., Wang, X., & Pan, W. (2024). Tackling cooperative incompatibility for zero-shot human-AI coordination. *Journal of Artificial Intelligence Research, 80*, 1139–1185. https://doi.org/10.1613/jair.1.15884

20. Hong, J., Levine, S., & Dragan, A. (2023). Learning to influence human behavior with offline reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2023), 36*, 36094–36105. https://doi.org/10.52202/075280-1565

21. Peng, Z., Mo, W., Duan, C., Li, Q., & Zhou, B. (2023). Learning from active human involvement through proxy value propagation. *Advances in Neural Information Processing Systems, 36*, 77969–77992.

22. Xu, M., Niyato, D., Kang, J., Xiong, Z., Mao, S., Han, Z., Kim, D. I., & Letaief, K. B. (2024). When large language model agents meet 6G networks: Perception, grounding, and alignment. *IEEE Wireless Communications, 31*(6), 63–71. https://doi.org/10.1109/MWC.005.2400019

23. Hu, Y., Teng, Y., Zhang, Y., Li, Q., Zhang, Y., & Song, X. (2024). AI service deployment and resource allocation optimization based on human-like networking architecture. *IEEE Internet of Things Journal, 11*(14), 24795–24813. https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3384546

24. Alarcon, M. L., Kambhampati, A., Roy, U., Nguyen, P. P., Attari, M., Surya, R., Bunyak, F., Maschmann, M. R., Palaniappan, K., & Calyam, P. (2024). Learning-based image analytics in user-AI agent interactions for cyber-enabled manufacturing. *2024 IEEE 4th International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS)* (pp. 1–7). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICHMS59971.2024.10555867

25. Strinati, E. C., Barbarossa, S., Choi, J., Madi, M. A., & Destounis, A. (2024). Goal-oriented and semantic communication in 6G AI-native networks: The 6G-GOALS approach. *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597087

26. Ayub, A., & Wagner, A. R. (2023). CBCL-PR: A cognitively inspired model for class-incremental learning in robotics. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 15*(4), 2004–2013. https://doi.org/10.1109/TCDS.2023.3299755

27. Such, F. P., Rawal, A., Lehman, J., Stanley, K. O., & Clune, J. (2020). Generative teaching networks: Accelerating neural architecture search by learning to generate synthetic training data. *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning* (pp. 9206–9216). PMLR.

28. Ye, D., Chen, G., Zhang, W., Yu, S., Yuan, X., Yuan, B., Liu, Z., Yang, L., Guo, J., Yu, Q., Bi, X., Wang, P., Qiu, M., Cheng, H., Yin, J., & Tang, J. (2020). Towards playing full MOBA games with deep reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems, 33*, 621–632.

29. Ye, D., Liu, Z., Sun, M., Shi, B., Zhao, P., Wu, H., ... Huang, L. (2020). Mastering complex control in MOBA games with deep reinforcement learning. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 34*(04), 6672–6679. https://doi.org/10.1609/aaai.v34i04.6144

30. Zha, D., Xie, J., Ma, W., Zhang, S., Lian, X., Hu, X., & Liu, J. (2021). DouZero: Mastering DouDizhu with self-play deep reinforcement learning. *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning* (pp. 12333–12344). PMLR.

31. Lan, Y. J., & Chen, N. S. (2024). Teachers' agency in the era of LLM and generative AI: Designing pedagogical AI agents. *Educational Technology & Society, 27*(1), 1–18. https://doi.org/10.30191/ETS.202401_27(1).PP01

32. Abhinav, K., Subramanian, V., Dubey, A., Bhat, P., & Venkat, A. D. (2018). LeCoRe: A framework for modeling learner's preference. *Proceedings of the 11th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2018)*. Buffalo, NY, USA. http://educationaldatamining.org/files/conferences/EDM2018/papers/EDM2018_paper_69.pdf

33. de Lima, E. S., Neggers, M. M. E., Feijo, B., Casanova, M. A., & Furtado, A. L. (2025). An AI-powered approach to the semiotic reconstruction of narratives. *Entertainment Computing, 52*, 100810. https://doi.org/10.1016/j.entcom.2024.100810

34. Bhunia, A.K., Das, A., Muhammad, U.R., Yang, Y., Hospedales, T.M., Xiang, T., Gryaditskaya, Y., & Song, Y. (2020). Pixelor. *ACM Transactions on Graphics (TOG), 39*, 1–15.

35. Sinha, M., Healey, J., & Sengupta, T. (2020). Designing with AI for digital marketing. *Adjunct Publication of the 28th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization (UMAP '20)* (pp. 65–70). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3386392.3397600

36. Tara, A., Taban, N., & Turesson, H. (2022). Performance analysis of an ontology model enabling interoperability of artificial intelligence agents. *Artificial Intelligence Trends in Systems* (pp. 395–406). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09076-9_35

37. Kalech, M., & Stern, R. (2020). AI for software quality assurance blue sky ideas talk. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 34*(9), 13529–13533. https://doi.org/10.1609/aaai.v34i09.7076

38. Senthil Velan, S. (2019). Introducing artificial intelligence agents to the empirical measurement of design properties for aspect oriented software development. 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence (AICAI) (pp. 80–85). https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701250

39. Xu, J., & Howard, A. M. (2020). How much do you trust your self-driving car? Exploring human-robot trust in high-risk scenarios. *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 4273–4280). https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9282866

40. Fuchs, A., Passarella, A., & Conti, M. (2022). A cognitive framework for delegation between error-prone AI and human agents. *2022 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)* (pp. 317–322). https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP55677.2022.00074

41. Skulmowski, A. (2024). Placebo or assistant? Generative AI between externalization and anthropomorphization. *Educational Psychology Review, 36*(2), 58. https://doi.org/10.1007/s10648-024-09894-x

42. Vetrò, A., Santangelo, A., Beretta, E., & De Martin, J. C. (2019). AI: From rational agents to socially responsible agents. *Digital Policy, Regulation and Governance, 21*(3), 291–304. https://doi.org/10.1108/DPRG-08-2018-0049

43. Shilov, N. G., Ponomarev, A. V., & Smirnov, A. V. (2023). The analysis of ontology-based neuro-symbolic intelligence methods for collaborative decision support. *Informatics and Automation, 22*(3), 576–615.

44. Kulkarni, A., Sreedharan, S., Keren, S., Chakraborti, T., Zha, Y., & Kambhampati, S. (2019). Explicable planning as minimizing distance from expected behavior. *Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS'19)* (pp. 774–782). International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

45. Xi, Z., Chen, W., Guo, X., He, W., Ding, Y., Hong, B., ... & Gu, J. (2023). The rise and potential of large language model based agents: A survey. *arXiv:2309.07864*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.07864

46. Li, X., Li, Y., Zhang, J., Xu, H., Chen, M., & Huang, X. (2024). A review of prominent paradigms for LLM-based agents: Tool use, planning (including RAG), and feedback learning. *Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024)* (pp. 9760–9779).

47. Händler, T. (2023). Balancing autonomy and alignment: A multi-dimensional taxonomy for autonomous LLM-powered multi-agent architectures. *arXiv.2310.03659*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.03659

48. Li, X., Wang, Y., Zhang, L., Liu, T., & Sun, M. (2024). A survey on LLM-based multi-agent systems: Workflow, infrastructure, and challenges. *Vicinagearth, 1*, 9. https://doi.org/10.1007/s44336-024-00009-2

49. Masterman, T., Besen, S., Sawtell, M., & Chao, A. (2024). The landscape of emerging AI agent architectures for reasoning, planning, and tool calling: A survey. *arXiv:2404.11584*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.11584

50. Kasirzadeh, A., & Gabriel, I. (2025). Characterizing AI agents for alignment and governance. *arXiv:2504.21848*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.21848

51. Zhou, J., Li, C., Chen, S., Wu, Y., & Xu, D. (2024). A taxonomy of architecture options for foundation model-based agents: Analysis and decision model. *arXiv:2408.02920*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02920

52. Kelly, S., Kaye, S.-A., & Oviedo-Trespalacios, O. (2023). What factors contribute to the acceptance of artificial intelligence? A systematic review. *Telematics and Informatics, 77*, 101925. https://doi.org/10.1016/j.tele.2022.101925

53. Jiangshu, Y., Zhang, S., Liang, H., Zhang, H., & Li, Y. (2025). *AI agents: A development guide*. Moscow: DMK Press. (In Russian).

54. Borne, P., Anderson, K., Woods, M., & Dimitrova, N. (2025). *Agentic artificial intelligence: A guide to business transformation*. Moscow: DMK Press. (In Russian).

55. Glukhov, A. P. (2025). AI agents in tutoring: Potential, challenges, and prospects for integration. *Journal of Pedagogical Innovations, 1*(77), 65–74 (in Russian). https://doi.org/10.15293/1812-9463.2501.06

56. Berman, N. D. (2025). Digital marketing: Using artificial intelligence for competitive strategies. *CITISE, 2*(44), 40–48 (in Russian).

57. Guzenko, O. I., & Balyabin, D. S. (2025). AI agents in project management: Opportunities, limitations, and integration strategies. *Project Management Bulletin, 1*(2), 71–78 (in Russian).

58. Ignatyev, V. I. (2019). And a "different" actor is coming... The formation of a techno-subject in the context of the movement towards technological singularity. *Sociology of Science and Technology, 10*(1), 64–78 (in Russian). https://doi.org/10.24411/2079-0910-2019-10005

About the authors

Iuliia Nikolaevna Naidenova

Candidate of Sciences (Economics);

Deputy Head, International Laboratory of Intangible-Driven Economy, Associate Professor, Department of Economics and Finance, HSE University – Perm, 38 Studencheskaya St., Perm 614070, Russia;

Email: yunaydenova@hse.ru

ORCID: 0000-0002-5838-1331

Petr Andreevich Parshakov

Candidate of Sciences (Economics), PhD;

Head, International Laboratory of Intangible-Driven Economy, Professor, Department of Economics and Finance, HSE University – Perm, 38 Studencheskaya St., Perm 614070, Russia;

Email: pparshakov@hse.ru

ORCID: 0000-0002-1805-2680

Aleksei Olegovich Smirnov

Research Intern, International Laboratory of Intangible-Driven Economy, HSE University – Perm, 38 Studencheskaya St., Perm 614070, Russia;

Email: aosmirnov@hse.ru

ORCID: 0009-0005-9684-3217

Elena Anatolyevna Shakina

Candidate of Sciences (Economics), PhD, MBA;

University Lecturer, Campus Universitario Lagoas-Marcosende, Vigo 36310, Pontevedra, Spain;

Email: eshakina@hse.ru

ORCID: 0000-0003-4048-6132

Evgeniya Andreevna Shenkman

Junior Research Fellow, International Laboratory of Intangible-Driven Economy;

Senior Lecturer, Department of Economics and Finance, HSE University – Perm, 38 Studencheskaya St., Perm 614070, Russia;

Email: shenkmanea@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9619-7674

DOI: 10.17323/2587-814X.2026.3.69.89

Исследование и анализ подходов и взглядов ИТ-специалистов на системную, корпоративную и бизнес-архитектуру предприятия: тенденции, проблемы, перспективы развития*

Руслан Исламович Мамедгулиев [a]
Email: mamedguliev-ruslan2000@yandex.ru

Ольга Анатольевна Цуканова [b]
Email: zoa1999@mail.ru

[a] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[b] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В практике управления организациями и информационными системами возрастает роль корпоративной архитектуры как инструмента обеспечения целостности и управляемости цифровых изменений, однако ее фактическое применение нередко носит формальный характер и не приводит к устойчивым управленческим эффектам. Целью настоящего исследования является анализ практик применения корпоративной ИТ-архитектуры предприятия в условиях цифровой трансформации организаций на российском и международном уровнях, а также выявление факторов, определяющих ее эффективность. Исследование выполнено в рамках качественного подхода и основано на результатах 39 экспертных интервью с ИТ-архитекторами, системными и бизнес-аналитиками, разработчиками, руководителями проектов и представителями академического сообщества. Применение метода экспертных интервью позволило выявить не только формальные аспекты использования архитектурных подходов,

* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

но и особенности их восприятия различными профессиональными ролями. Полученные результаты показали, что ключевые проблемы эффективности корпоративной архитектуры обусловлены не столько технологическими ограничениями или недостатками используемых каркасов, сколько уровнем организационной зрелости, качеством ролевого взаимодействия и степенью интеграции архитектурной деятельности в управленческие и операционные процессы. Установлено, что в условиях низкой зрелости архитектурные подходы применяются фрагментарно и преимущественно в виде изолированной документации, тогда как при более высоком уровне зрелости они становятся инструментом поддержки принятия решений и управления изменениями. На основе анализа экспертных оценок выявлены основные проблемы реализации архитектурной практики и предложены направления их преодоления, включая смещение фокуса с формального моделирования на развитие управленческих и организационных механизмов. Кроме того, обоснована необходимость формирования архитектурных компетенций на более поздних этапах профессионального развития специалистов, при наличии практического опыта работы с процессами и ИТ-системами.

Ключевые слова: архитектурные комитеты, архитектура предприятия, бизнес-архитектура, качественное исследование, кибербезопасность ИТ-систем, корпоративная архитектура, проектирование ИТ-архитектуры, системная архитектура, управление архитектурой, форсайт-прогнозирование, экспертные интервью

Цитирование: Мамедгулиев Р. И., Цуканова О. А. Исследование и анализ подходов и взглядов ИТ-специалистов на системную, корпоративную и бизнес-архитектуру предприятия: тенденции, проблемы, перспективы развития // Бизнес-информатика. 2026. Т. 20. № 3. С. 69–89. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.69.89

Введение

В условиях реализации проектов цифровой трансформации организаций существенно возрастает роль корпоративной ИТ-архитектуры как инструмента для обеспечения согласованности, управляемости и устойчивости информационного ландшафта, а также устранения дублирующих систем и процессов.

С расширением организации ее ИТ-ландшафт становится значительно более сложным, и в управлении такой организационной системой требуется системный подход в проектировании и развитии архитектурных систем, характеризующихся динамичностью, многослойностью и имеющих свои жизненные циклы. Применение архитектурного подхода как управленческой практики становится важным фактором достижения стратегических целей.

В идеальной ситуации архитектура предприятия должна выступать не только набором формализованных моделей и методологий, но и полноценным инструментом управления организацией, обеспечивая согласование стратегических целей, бизнес-процессов и ИТ-ландшафта организации. Это предполагает интеграцию архитектурных практик в процессы принятия решений, планирования и управления изменениями, а также их использование в качестве основы для повышения прозрачности и эффективности цифровой трансформации.

Корпоративная архитектура, с практической точки зрения, включает в себя различные архитектурные каркасы, стандарты и методологии. При этом сохраняется разрыв между данными подходами и их фактическим применением на уровне многих организаций – как в коммерческих предприятиях, так и в органах государственной власти. В хозяйственной деятельности компаний использование архитектурного подхода носит преимущественно формальный характер и применяется в основном при принятии управленческих решений, особенно в условиях жестких сроков и кор-

поративных ограничений. При этом наблюдается рост технического долга, гибкость процессов в ИТ-ландшафте снижается, а между всеми участниками ИТ-проектов и инициатив по реинжинирингу процессов возникают конфликты.

Для формализации архитектурного подхода и уточнения терминологии целесообразно выделить и разграничить ключевые уровни архитектуры предприятия. Корпоративная архитектура предприятия определяется как совокупность принципов и моделей, которые обеспечивают согласование стратегии организации, ее бизнес-деятельности и ИТ-ландшафта [1]. Бизнес-архитектура фокусируется на описании бизнес-модели, ключевых процессов, а также цепочек создания ценности, формируя требования к изменениям и развитию программных систем [2]. Системная архитектура рассматривает структуру и взаимодействие программных компонентов, данных и инфраструктуры. В контексте разработки приложений, системная архитектура рассматривает ИТ-системы на уровне модулей, сервисов, интеграций систем и технологических платформ, обеспечивая масштабируемость, сопровождение и управляемость жизненного цикла программных решений [3].

В исследовании рассмотрен ограниченный набор архитектурных каркасов и связанных с ними инструментов моделирования, используемых в практической деятельности по архитектуре предприятия. В качестве основных архитектурных каркасов были выбраны TOGAF (версия 10 от 2025 г.), ArchiMate (версия 3.2 от 2024 г.), а также ряд альтернативных и сопоставимых подходов, включая FEAF, GEA и OMG Unified Architecture Framework (UAF, версия 1.3 от 2025 г.). Выбор указанных каркасов обусловлен их распространенностью в международной и российской практике, а также возможностью применения для анализа архитектурной деятельности на различных уровнях – от бизнес- до системной архитектуры.

Важно разграничить архитектурные каркасы и языки моделирования: такие нотации, как UML, BPMN, SysML, не являются самостоятельными архитектурными каркасами, а выступают в качестве инструментов описания и визуализации архитектурных решений, применяемых в рамках различных методологий. Один и тот же язык моделирования может использоваться в разных архитектурных каркасах, что требует их четкого разделения.

В исследовании также учитываются смежные стандарты и подходы, оказывающие непосредственное влияние на формирование архитектурной практики, включая стандарты серии ISO (ISO 42010, ISO 15288, ISO 9000, ISO 9001), а также отраслевые модели, такие, как eTOM. Учет данных подходов позволил расширить границы анализа и обеспечить более комплексное рассмотрение архитектуры предприятия как междисциплинарной области.

Динамика развития архитектурных стандартов также была учтена в исследовании, поскольку, в частности, актуальные версии каркасов TOGAF и ArchiMate отражают эволюцию подходов к управлению архитектурой и их востребованность в профессиональном и научном сообществах. Это позволяет рассматривать архитектурные каркасы не как статические модели, а как развивающиеся инструменты, адаптирующиеся к новым условиям цифровой трансформации.

Исследование консалтинговой компании Gartner [4] указывает, что значительное число проектов по тематике цифровой трансформации организаций претерпевают неудачи не только из-за поспешных управленческих решений, но и отсутствия системного подхода в управлении, обеспечиваемого архитектурным подходом. 87% руководителей считают цифровизацию своей организации приоритетом, однако только около 48% всех инициатив достигают конечной цели из года в год. Работа над цифровой трансформацией предполагает внедрение подхода по экономике данных, так как анализ данных является частью архитектурного подхода в управлении процессами, анализе пользовательского опыта и в деятельности по технической эксплуатации информационных систем и компонентов. Около 34% собственного дохода компании теряют из-за сопротивления сотрудников нововведениям.

Целью исследования является установление и систематизация практико-ориентированных факторов, а также выявления тенденций развития архитектуры предприятия на основе экспертных оценок и опыта специалистов, которые определяют результативность применения в организация корпоративной ИТ-архитектуры.

Первая гипотеза заключается в том, что ключевые проблемы результативности использования корпоративной ИТ-архитектуры обусловлены не технологическими ограничениями, а несогласованностью и

неструктурированностью архитектурных практик с организационными процессами, ролевым участием всех специалистов и управленческими механизмами слабого характера, что приводит к формальному применению архитектурного подхода в организациях и снижению его практической ценности.

Вторая гипотеза исследования заключается в том, что качественная реализация корпоративной ИТ-архитектуры в организациях в значительной степени зависит от степени зрелости ролевого взаимодействия между ИТ-архитекторами, аналитиками, разработчиками и управленческими ролями. При отсутствии четкого распределения ответственности и прозрачных механизмов принятия архитектурных решений архитектурная функция размывается между участниками проектов, что приводит к конфликтам ролей, дублированию функций и снижению устойчивости принимаемых решений. В таких условиях архитектура перестает выступать в качестве интеграционного механизма и воспринимается участниками как избыточный или формальный слой над реальной проектной деятельностью.

Третья гипотеза заключается в том, что формальный характер применения архитектурных каркасов, нотаций и разных моделей обусловлен не столько их методологическими ограничениями, сколько отсутствием адаптации артефактов архитектуры в управленческие и операционные контуры организации. Предполагается, что при использовании архитектурных моделей преимущественно в виде отчетной или описательной документации, не связанной с процессами планирования, бюджетирования, управления изменениями и оценки эффективности, архитектурный подход не оказывает измеримого влияния на результаты цифровой трансформации. В этом случае архитектура не выполняет функцию инструмента принятия решений и теряет практическую ценность для бизнеса и ИТ-подразделений.

Для проверки гипотез и анализа практики реализации архитектурного подхода были привлечены специалисты, которые вовлечены в процессы проектирования, разработки, внедрения и эксплуатации программных систем, а также в операционную работу. Основным методом исследования стали экспертные интервью, позволившие выявить практические аспекты архитектурной деятельности.

Научная новизна статьи заключается в выявлении системных противоречий и ролевых конфликтов между различными профессиональными ролями, влияющими на внедрение архитектурного подхода в управленческие процессы предприятия. В отличие от иных научных исследований, ориентированных преимущественно на анализ формализованных архитектурных моделей и методологий, в работе реализован подход, основанный на анализе практического опыта специалистов и сопоставлении их профессиональных позиций. Данный подход позволил выявить особенности восприятия и применения архитектурной концепции в реальных условиях деятельности организаций и определить факторы, ограничивающие ее практическую эффективность. На основе анализа были выделены основные тенденции, проблемы и перспективы развития заявленной предметной области.

Результаты исследования направлены на выявление ключевых проблем и ограничений реализации архитектурного подхода в организациях, систематизацию факторов, влияющих на его эффективность. На основе анализа экспертных интервью авторами предполагалось сформировать целостное представление о практике применения архитектуры предприятия, выявить устойчивые паттерны ролевого взаимодействия и определить ключевые направления повышения значимости архитектурных решений в условиях процессов цифровой трансформации.

Структура статьи включает два взаимосвязанных раздела. В первом разделе рассматриваются теоретические подходы и методология настоящего исследования. Во втором – представлены результаты экспертных интервью и их интерпретация, а в заключении сформулированы выводы и направления для дальнейших исследований.

1. Материалы исследования и методы

1.1. Теоретические подходы к исследованию архитектуры предприятия

Современные исследования в области архитектуры предприятия охватывают широкий спектр направлений, включая разработку и развитие архитектурных каркасов, формализацию языков моделирования, интеграцию архитектурных подходов в управленческие процессы, а также оценку зрелости архитектурной деятельности в организациях. Значительное внимание уделяется вопросам согласования бизнес- и информационно-технологической стратегии, управлению сложными информационными системами и обеспечению устойчивости процессов цифровой трансформации. В то же время часть на-

учных работ сосредоточена на прикладных аспектах внедрения архитектурных практик, в том числе организацию архитектурной функции, распределение ролей и взаимодействие участников проектов.

В научных публикациях последних лет (2015–2025) архитектура предприятия рассматривается преимущественно как инструмент стратегического и организационного управления цифровыми изменениями, а не только как информационно-технологическая структура. Это подчеркивается в работах российских исследователей [5–7], где архитектура трактуется как связующее звено между трансформацией ИТ-ландшафта и стратегическим развитием организации. В зарубежных исследованиях данное направление получило развитие в работах [9–11], анализирующих роль архитектурных артефактов и их влияние на гибкость и устойчивость организаций. Отдельное направление исследований связано с оценкой цифровой зрелости и готовности организаций к цифровой трансформации, что отражено, в частности, в работах [12–14].

Наряду с концептуальными исследованиями в научной литературе представлен значительный массив практико-ориентированных работ [15–17], посвященных внедрению архитектурного подхода на уровнях данных, приложений и технологической архитектуры. В этих научных исследованиях архитектура предприятия рассматривается как комплексный инструмент снижения рисков и повышения устойчивости информационных систем. В зарубежной литературе сформировано представление об архитектуре предприятия как о междисциплинарной практике, интегрирующей стратегические, технологические и организационные аспекты управления [18].

В отличие от рассмотренных работ, в которых архитектура предприятия анализируется преимущественно на концептуальном уровне или через отдельные прикладные практики, настоящее исследование ориентировано на сопоставление архитектурной деятельности через призму восприятия различных профессиональных ролей. Использование экспертных интервью в качестве основного метода позволило выявить системные противоречия и ролевые конфликты, возникающие в процессе реализации архитектурных решений в организациях. Такой подход обеспечил переход от описания архитектурных моделей и методологий к анализу их фактической применимости и ограничений в условиях практической деятельности.

1.2. Методология и инструменты анализа

Настоящее исследование выполнено в рамках качественного подхода, ориентированного на анализ практик реализации архитектурной концепции в организациях. Основным методом сбора данных выступили экспертные интервью, позволившие выявить не только формальные аспекты применения архитектурных подходов, но и особенности их восприятия представителями различных профессиональных ролей. Применение этого метода обеспечило получение глубинных данных о механизмах функционирования архитектурной деятельности, включая управленческие, организационные и коммуникационные аспекты.

Методологическая основа исследования опирается на подходы качественного анализа и современные практики проведения экспертных интервью, представленные в работах [19–21]. Их использование позволило структурировать процесс сбора и интерпретации данных, а также обеспечить сопоставимость результатов между различными группами экспертов. Особое внимание в исследовании уделено сопоставлению позиций специалистов, что дало возможность выявить системные различия в восприятии архитектурной деятельности.

Для анализа полученных данных применен контент-анализ экспертных интервью, направленный на выявление повторяющихся тем, паттернов и устойчивых противоречий в высказываниях респондентов. Дополнительно использована структурированная модель интерпретации, основанная на сопоставлении факторов, связанных с организационными процессами, ролевым взаимодействием и технологическими аспектами архитектурной деятельности. Это позволило перейти от анализа отдельных экспертных оценок к выявлению тенденций и системному рассмотрению исследуемой области.

Аналитическая рамка исследования сформирована на основе ограниченного набора архитектурных каркасов, включая TOGAF, ArchiMate, а также сопоставимые подходы (FEAF, UAF). Выбор данных каркасов обусловлен их распространенностью в международной и российской практике, а также применимостью для анализа архитектурной деятельности на различных уровнях – от бизнес- до технологической архитектуры. При этом в исследовании было учтено разграничение архитек-

турных каркасов и языков моделирования. Такие нотации, как UML, BPMN и SysML, рассматриваются как инструменты визуализации и описания архитектурных решений. Учет актуальных версий каркасов позволил рассмотреть их как развивающиеся инструменты, адаптирующиеся к условиям цифровой трансформации.

Дополнительно учтены положения международных стандартов (ISO 42010, ISO 15288 и др.), выступающих нормативно-методической основой для интерпретации архитектурной деятельности и уточнения понятийного аппарата. В ходе экспертных интервью респондентам задавались вопросы, направленные на оценку их отношения к указанным стандартам и архитектурным каркасам, а также особенностей их применения в профессиональной практике и в организациях.

В результате исследования сформированы аналитические артефакты, включающие в себя: визуализацию динамики поисковых запросов по теме архитектуры предприятия и цифровой трансформации, анализ научной активности в предметной области, сравнительную интерпретацию восприятия проблем профильными ИТ-специалистами и научным сообществом; причинно-следственную модель выявленных проблем, представленную в форме диаграммы Исикавы [22].

1.3. Организация и проведение эмпирического исследования (экспертных интервью)

На основе экспертных интервью выполнено комплексное сопоставление восприятия архитектурной практики и ее применимости в российских, а также частично в международных компаниях. Проведенные интервью позволили объединить практический и академический опыт ИТ-специалистов и представителей научного сообщества, охватывающих 16 отраслей.

В исследовании приняли участие 15 ИТ-архитекторов, задействованных в реализации цифровых и организационных проектов в частных компаниях, консалтинге и государственных корпорациях (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, регионы Дальнего Востока), включая пять руководителей архитектурных доменов, двух корпоративных архитекторов, пять системных архитекторов и трех бизнес-архитекторов.

Дополнительно были опрошены группы ИТ-аналитиков, проектных менеджеров и разработчиков (по пять представителей каждой категории), что позволило уточнить особенности их взаимодействия с архитекторами при решении профессиональных задач, а также их восприятие роли ИТ-архитектора. Часть респондентов представляет международную практику (США, Индия, Португалия, Кипр, Великобритания).

Обобщенные сведения об участниках исследования представлены в *таблице 1.*

Продолжительность каждого интервью составляла не менее 60 минут (максимальная – около 150 минут), они проходили в онлайн-формате с использованием платформ видеосвязи «Яндекс Телемост» и «Zoom». Экспертные интервью проводились по стандартизированным перечням вопросов на основе заранее подготовленных гайдов для каждой категории специалистов. Все интервью записывались с согласия респондентов и впоследствии транскрибировались. Всем экспертам гарантировалась полная анонимность. Полученные материалы были систематизированы и проанализированы с использованием методов контент-анализа.

При планировании интервью особое внимание уделялось вопросам реализации архитектуры данных в организациях, взаимодействию профессиональных ролей, обеспечению информационной безопасности, а также перспективам развития корпоративной архитектуры и подготовке ИТ-архитекторов. Указанные направления были отражены в разработанных гайдах для экспертов. Дополнительно рассматривались вопросы взаимодействия участников проектов, процессов принятия архитектурных решений, использования стандартов, инструментов и метрик, а также управления рисками и качеством ИТ-решений. Такой подход обеспечил формирование комплексного представления о практике реализации корпоративной архитектуры, ее ограничениях и направлениях развития в условиях цифровой трансформации.

Сведения о представителях академического сообщества, принявших участие в экспертных интервью, приведены в *таблице 2.* В исследовании участвовали девять представителей академической среды, включая трех кандидатов технических наук, двух докторов технических наук, одного кандидата физико-математических наук, одного кандидата экономических наук, одного доктора эконо-

Таблица 1.

Качественное исследование: выборка экспертов из компаний

№	Должность респондента	Размер компании	Отрасль	Географическая принадлежность компании
ИТ-архитекторы (корпоративные, бизнес- и системные)				
$Э_1$	Системный архитектор	Крупная	Нефть и газ	Россия
$Э_2$	Руководитель домена	Крупная	Финансы	Россия
$Э_3$	Руководитель домена	Крупная	Телеком	Россия
$Э_4$	Корпоративный архитектор	Средняя	Консалтинг	Россия
$Э_5$	Системный архитектор	Крупная	Финансы	Россия
$Э_6$	Руководитель домена	Средняя	Строительство	Россия
$Э_7$	Корпоративный архитектор	Сверхкрупная	Финансы	Россия
$Э_8$	Руководитель домена	Крупная	Ритейл	Россия
$Э_9$	Бизнес-архитектор	Средняя	Консалтинг	Россия
$Э_{10}$	Системный архитектор	Средняя	Консалтинг	Россия
$Э_{11}$	Бизнес-архитектор	Сверхкрупная	Нефть и газ	Россия
$Э_{12}$	Системный архитектор	Крупная	ИТ-технологии	Россия
$Э_{13}$	Системный архитектор	Сверхкрупная	Нефть и газ	Россия
$Э_{14}$	Бизнес-архитектор	Средняя	Финансы	Россия
$Э_{15}$	Руководитель домена	Крупная	Телеком	Международная
Системные и бизнес-аналитики				
$Э_{16}$	Лидер аналитиков	Средняя	ИТ-технологии	Россия
$Э_{17}$	Системный аналитик	Средняя	Металлургия	Россия
$Э_{18}$	Бизнес-аналитик	Средняя	Авиация	Россия
$Э_{19}$	Бизнес-аналитик	Крупная	Консалтинг	Россия
$Э_{20}$	Fullstack-аналитик	Средняя	Образование	Международная
Проектные и продуктовые менеджеры				
$Э_{21}$	ИТ-директор (CIO)	Средняя	Агрокомплекс	Россия
$Э_{22}$	Ген. директор (CEO)	Микро	Биотехнологии	Россия
$Э_{23}$	Руководитель внедрения	Сверхкрупная	Энергетика	Россия
$Э_{24}$	Технический менеджер	Крупная	Транспорт	Международная
$Э_{25}$	Руководитель проектов	Крупная	Энергетика	Россия
Разработчики решений (frontend, backend и fullstack developers)				
$Э_{26}$	Разработчик интерфейса (frontend)	Крупная	Эл. коммерция	Россия
$Э_{27}$	Разработчик под Android	Крупная	ИТ-технологии	Россия
$Э_{28}$	Универсальный разработчик (fullstack)	Средняя	Финансы	Международная
$Э_{29}$	Руководитель команды разработки серверной инфраструктуры (backend)	Сверхкрупная	ИТ-технологии	Россия
$Э_{30}$	Разработчик интерфейса (frontend)	Средняя	Здравоохранение	Международная

Примечание: размер компании определяется как: микро (выручка до 120 млн руб. и до 15 чел.), малые (до 800 млн руб. и до 100 чел.), средние (до 2,5 млрд руб. и до 250 чел.), крупные (свыше 2,5 млрд руб. и более 251 чел.), сверхкрупные организации (свыше 100 млрд руб. и численностью более 50 тыс. чел.).

Таблица 2.

Качественное исследование: эксперты из научного сообщества

№	Звание респондента	Профиль вуза	Научные интересы
$Э_{31}$	Кандидат физико-математических наук	Экономический	Машинное обучение, анализ данных, принятие решений
$Э_{32}$	Старший преподаватель	Экономический	Бизнес-архитектура и внедрение ИТ-систем
$Э_{33}$	Кандидат экономических наук	Технический	Архитектура предприятия, цифровая трансформация
$Э_{34}$	Кандидат технических наук	Технический	Децентрализованные системы, разработка ПО
$Э_{35}$	Доктор технических наук	Технический	Информационная безопасность, разработка ПО
$Э_{36}$	Кандидат технических наук	Экономический	Архитектура предприятия
$Э_{37}$	Кандидат технических наук	Технический	Системная архитектура и доменное проектирование
$Э_{38}$	Доктор экономических наук	Технический	Архитектура предприятия, бизнес-инжиниринг
$Э_{39}$	Доктор технических наук	Экономический	Онтологические модели, управление знаниями

мических наук и одного старшего преподавателя. Респонденты представили экспертные оценки перспектив развития архитектуры предприятия как научной концепции и практической деятельности, а также высказали мнение о готовности системы образования к подготовке ИТ-архитекторов.

Анализ экспертных интервью предполагал тематическое сопоставление позиций представителей разных ИТ-специальностей и выявление устойчивых паттернов, отражающих практику реализации корпоративной архитектуры. Это позволило перейти от отдельных оценок экспертов к системному описанию проблем и особенностей архитектурной деятельности, которые далее рассматриваются в следующем разделе.

2. Результаты экспертных интервью и их обсуждение

При анализе результатов экспертных интервью учитывался принцип разграничения архитектурных каркасов и языков моделирования. Архитектурные каркасы (TOGAF, ArchiMate и др.) рассматривались как методологическая основа организации архитектурной деятельности, тогда как UML, BPMN и другие нотации – как инструменты описания и визуализации решений. Это разграничение позволило обеспечить корректную интерпретацию высказываний респондентов и избежать смешения понятий различных уровней абстракции.

Выбор архитектурных каркасов (TOGAF, ArchiMate и сопоставимых подходов) определил структуру анализа экспертных интервью, поскольку именно данные методологии чаще всего упоминались респондентами как ориентиры при решении архитектурных задач в профессиональной деятельности. В то же время смежные стандарты и подходы (ISO, eTOM и др.) рассматривались экспертами преимущественно как нормативная или отраслевая база, а не как инструменты повседневного применения, что обусловило их вспомогательную роль в интерпретации результатов.

Отправной точкой анализа является позиция одного из представителей академического сообщества ($Э_{31}$), принявшего участие в исследовании: *«Архитектура предприятия – довольно маргинальное направление, в котором ничего не произошло в течение последних 20 лет»*. Данное высказывание отражает скептическое отношение части научного сообщества к эволюции архитектуры предприятия как самостоятельной области знаний. Подобное восприятие во многом связано с отсутствием в последние годы принципиально новых архитектурных парадигм и доминированием ранее сформированных каркасов и подходов. В то же время такая оценка не учитывает трансформацию архитектурной практики, происходящую под влиянием цифровизации, усложнения ИТ-ландшафтов и изменения роли информационных технологий в управлении организациями. Указанное противоречие между

восприятием архитектуры как «статичной» дисциплины и ее практической значимостью в условиях цифровой трансформации выступило отправной точкой для проведения анализа.

С одной стороны, данная позиция представляется обоснованной, поскольку пик интереса к архитектуре предприятия пришелся на начало 2000-х годов. Это подтверждается данными поисковой системы Google: максимальный уровень поисковых запросов по словосочетанию «Enterprise Architecture» (архитектура предприятия) зафиксирован в 2004 году *(рис. 1)*. Вместе с тем наблюдается тенденция к снижению интереса к данному запросу после 2005 года, тогда как к 2016 году наибольшую популярность приобретает запрос «Digital Transformation» (цифровая трансформация).

Вместе с тем данная тенденция не означает стагнации самой области архитектуры предприятия и ее практического применения. Динамика развития архитектурных каркасов и стандартов сви-детельствует о продолжающейся эволюции методологических подходов. Несмотря на то, что базовые архитектурные концепции были сформированы ранее, их последующие версии (в частности, TOGAF 9, TOGAF 10, ArchiMate 3.0–3.2) отразили адаптацию к новым условиям и вызовам цифровой трансформации. Таким образом, интерес профессионального сообщества к архитектурным практикам сохраняется, однако их практическая ценность в бизнес-среде по-прежнему воспринимается неоднозначно.

В исследовании основной акцент сделан на широко применяемых в современной практике архитектурных каркасах, таких как TOGAF и ArchiMate. По результатам экспертных интервью было установлено, что эти каркасы чаще всего используются в качестве ориентиров и рекомендательных практик. В то же время смежные стандарты и подходы, включая ISO (в частности, ISO 42010, ISO 15288), eTOM, FEAF, GEAF, OMG Unified Architecture Framework (UAF), а также специализированные языки моделирования (например, SysML), практически не рассматриваются экспертами как основные инструменты архитектурной деятельности. По их мнению, данные подходы применяются преимущественно в узкоспециализированных или регламентированных областях (например, в системной инженерии, государственном управлении или телекоммуникационной отрасли), либо выполня-

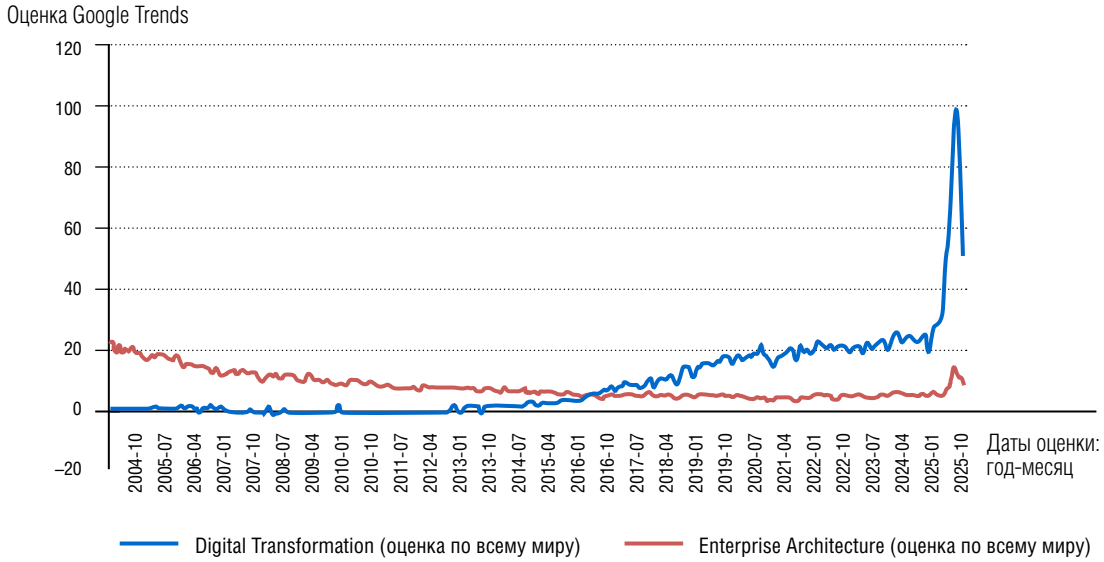


Рис. 1. Соотношение поисковых запросов[1] (с января 2004 г. по ноябрь 2025 г.) «Enterprise Architecture» и «Digital Transformation» в поисковой системе Google Trends [23, 24][2].

[1] Динамика рассчитана не на основании количества запросов, а на основании экспертных оценок в рамках 100-балльной шкалы (подход Google Trends).

[2] Интернет-сервис «Яндекс Вордстат» [25, 26] не используется в настоящей статье, поскольку в нем имеются данные о поисковых запросах, начиная с 01 января 2018 г.

ют роль нормативной базы, а не практического инструмента принятия решений. В результате их использование носит фрагментарный характер и, как правило, не интегрировано в процессы управления архитектурой в большинстве организаций.

Язык архитектурного моделирования ArchiMate преимущественно применяется в крупных государственных организациях и компаниях с государственным участием, тогда как компании, ориентированные на гибкие подходы и высокую операционную скорость, используют его значительно реже. Как отметили эксперты ($Э_2$, $Э_4$, $Э_{10}$, $Э_{11}$), ArchiMate и TOGAF применяются точечно и фрагментарно, а не как устойчивый механизм управления архитектурой. В ряде случаев предпочтение отдается более простым средствам визуализации (например, Miro), позволяющим оперативно представлять бизнес- и системную архитектуру. Даже в организациях с развитой культурой применения архитектурных каркасов (TOGAF, ArchiMate) и языков моделирования (UML, BPMN и др.) отмечается, что их использование приносит ценность на этапе внедрения ИТ-систем, однако не приводит к изменению управленческих практик и развитию архитектурного мышления сотрудников – *«модели так и остаются витриной»* ($Э_{11}$).

В то же время утверждение представителя академического сообщества ($Э_{31}$) о стагнации архитектуры предприятия не может считаться полностью обоснованным. Несмотря на отсутствие принципиально новых архитектурных парадигм, наблюдается устойчивый рост научной активности в данной области (*рис. 2*): начиная с 2014 года количество публикаций по теме архитектуры предприятия существенно увеличивается и достигает пиковых значений в 2021 году (более 19 тысяч научных публикаций). По мнению другого эксперта ($Э_{38}$), это обусловлено междисциплинарным характером архитектуры предприятия, охватывающей широкий спектр направлений: управление изменениями, проектное управление, бизнес-процессы, системную архитектуру и методы моделирования. Довольно существенная часть публикаций связана с развитием концепции цифровой трансформации.

В настоящее время корпоративная архитектура обладает высокой значимостью для крупных компаний различных отраслей экономики. Архитектурное консультирование на международном уровне осуществляют такие консалтинговые компании, как Gartner, McKinsey, PwC и Deloitte, в России аналогичную деятельность ведут компании «Технологии Доверия» и «Яков и Партнеры». Необходимость в распространении идей по архитектурной трансформации осознается рядом российских компаний, включая «Газпром нефть», «Норильский никель», «Т-Банк», «МТС», «Reksoft», «ВТБ» и другие. Профессиональным сообществом архитекторов регулярно организуются тематические мероприятия, такие, как конференции «Arch.Conf» от «Sber Developers», «ArchDays», а также специализированные митапы. Кроме того, в экосистеме «Сбер» в 2023 году был разработан каркас SEAF (Sber Enterprise Architecture Framework), специалисты компании также осуществляют консалтинг в области корпоративной ИТ-архитектуры.

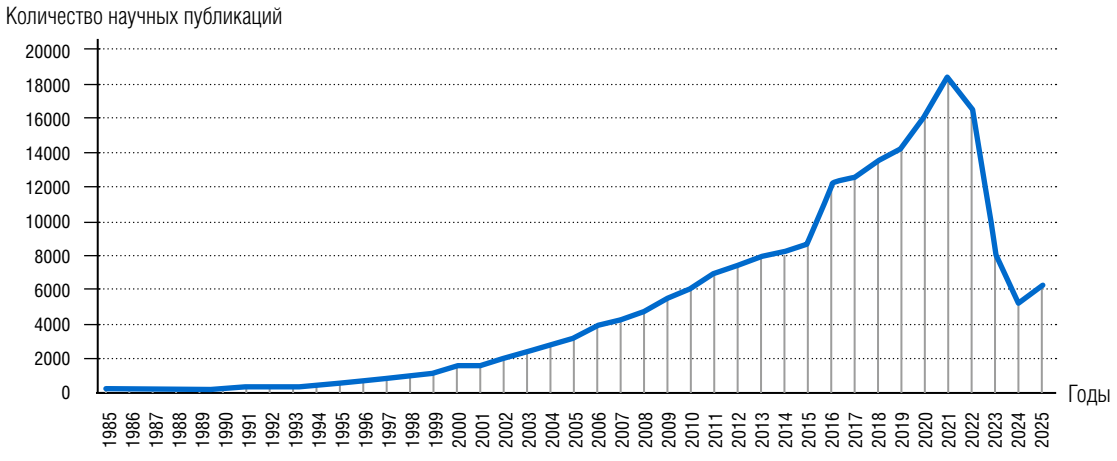


Рис. 2. Динамика научной активности по теме корпоративной архитектуры (1985–2025 гг.).
Составлено авторами на основе данных из международной базы «The Lens» [27].

В качестве альтернативы традиционным подходам к описанию архитектуры предприятия в последние годы получили распространение практики «Архитектура как код» и «Документация как код». Подход «Архитектура как код» («Architecture as Code», или «AaC») основан на представлении архитектурных решений в виде артефактов, описываемых с использованием программного кода, подлежащих автоматизированной обработке, хранению и повторному использованию [28]. Ключевыми принципами данного подхода являются интеграция архитектурных описаний в процессы разработки и управления ИТ-системами, а также обеспечение их версионирования и воспроизводимости. В свою очередь, подход «Документация как код» («Documentation as Code», или «Docs as Code») предполагает хранение документации в репозиториях совместно с программным кодом, использование систем контроля версий и автоматизированных инструментов сборки и проверки [29]. Это обеспечивает актуальность, согласованность и трассируемость документации на протяжении жизненного цикла разработки программного обеспечения.

Эксперты ($Э_4$, $Э_{27}$, $Э_{29}$, $Э_{30}$) в целом положительно оценивают данные подходы, однако отмечают их ограниченную универсальность: они наиболее эффективны в условиях высокого уровня зрелости организационных процессов, при котором традиционная *«мертвая»* ($Э_{15}$) документация заменяется более гибкими средствами. Кроме того, использование синтаксиса языка PlantUML в среде Visual Studio Code, по мнению респондентов, позволяет существенно ускорить процесс разработки архитектурных описаний. При этом эксперты подчеркивали: *«Архитектура и документация как код хорошо показывают расхождения между целевым и фактическим состоянием, но не решают вопрос – кто и зачем принимает архитектурные решения»* ($Э_5$–$Э_9$).

Проблема ролевых конфликтов остается одной из наиболее сложных в контексте взаимодействия ИТ-специалистов и распределения ответственности. Один из разработчиков, работающий в сфере электронной коммерции, отметил: «Эти специалисты забирают всю творческую часть нашей деятельности, и работа по написанию кода, например, лично для меня стала предельно монотонной и скучной» ($Э_{26}$). Руководитель архитектурного домена в крупной международной компании частично поддержал данную позицию, указав, что профессия системного аналитика зачастую используется для того, чтобы «закрыть недостающие пробелы в проектах» ($Э_{15}$), а не формировать самостоятельную ценность. В то же время системные и бизнес-аналитики ($Э_{16}$–$Э_{20}$) не согласились с данной позицией, подчеркнув, что *«системные аналитики нужны, в частности, чтобы представлять технические решения на языке бизнеса, так как большая часть ИТ-разработчиков не умеют делать этого»*. Респонденты также отметили, что они как аналитики частично участвуют в реализации архитектурных функций, однако основная ответственность за проектирование архитектуры решений возлагается на ИТ-архитекторов ($Э_{16}$).

Следует отметить, что профессия ИТ-архитектора в России начала формироваться в 2010-е годы, когда крупные компании стали выстраивать экосистемы и холдинговые структуры. Как отметили специалисты с многолетним опытом ($Э_4$, $Э_5$, $Э_6$, $Э_8$–$Э_{10}$), на начальном этапе данная роль носила преимущественно консультативный характер. По мере усложнения ИТ-решений и архитектурных систем, а также под влиянием международных практик, *«западный консалтинговый бизнес стал популяризировать роль архитектора, и в компаниях начали появляться архитектурные позиции»* ($Э_4$). При этом внедрение данной роли сопровождалось значительными трудностями: организации не всегда были готовы к ее интеграции. Эксперты ($Э_3$, $Э_7$, $Э_{12}$–$Э_{14}$) приводили примеры из практики, когда предложения архитекторов встречали сопротивление со стороны коллег, а сами специалисты подвергались профессиональному давлению вплоть до увольнения. Систематизация выявленных в ходе экспертных интервью проблем представлена в форме диаграммы Исикавы (*рис. 3*).

Часть опрошенных специалистов четко обозначили позицию о том, что отсутствие ИТ-архитекторов в проектах негативно сказывается на их реализации ($Э_3$, $Э_{11}$, $Э_{14}$). По мнению руководителя ($Э_{16}$) системных аналитиков компании, специализирующейся на проектах по информационной безопасности, *«в этой сфере ИТ-архитекторы крайне важны в связи со сложной спецификой разрабатываемых решений»*. Востребованность ИТ-архитекторов и аналитиков отмечается и в сфере мобильных перевозок ($Э_{24}$), поскольку в масштабируемых ИТ-проектах ответственность за коммуникацию со стейкхолдерами, проектирование решений и изучение функционального бизнес-домена нередко полно-



Рис. 3. Проблемы архитектурной практики в российских и международных компаниях по мнению экспертов.

стью переходит к техническим лидерам. Опрошенные специалисты рассматривают данную ситуацию как проблему, обусловленную недостаточной проработанностью операционных процессов на уровне высшего управления ($Э_6$, $Э_9$, $Э_{17}$, $Э_{23}$).

Еще одной проблемной зоной, по мнению системных архитекторов, аналитиков и разработчиков, является процесс согласования решений на архитектурных комитетах и в подразделениях, отвечающих за информационную безопасность. Эксперты ($Э_{11}$, $Э_{12}$, $Э_{22}$, $Э_{23}$, $Э_{29}$) отмечали, что формально данные процедуры направлены на снижение организационных и технических рисков, однако на практике они нередко превращаются в «бутылочное горлышко» при реализации ИТ-проектов. Командам приходится проходить многочисленные согласования для утверждения решений, при этом предлагаемые инициативы зачастую вступают в противоречие с требованиями информационной безопасности и архитектурными ограничениями. Как отметил один из экспертов, *«архитектурный комитет часто оценивает решения в вакууме, без понимания сроков и давления со стороны бизнеса, а служба безопасности руководствуется принципами максимума запретов»* ($Э_{29}$). В результате ИТ-команды либо замедляют работу, либо, напротив, ускоряют ее за счет поиска обходных решений, что парадоксальным образом повышает экономические и технические риски.

Данные процессы приводят к снижению согласованности деятельности, дублированию функций и нарушениям коммуникаций. Эксперты ($Э_1$, $Э_{15}$, $Э_{17}$, $Э_{18}$, $Э_{21}$) неоднократно указывали на наличие ручного труда, функциональных пересечений и разрывов между подразделениями, в условиях которых каждый участник *«автоматизирует свой кусок»* ($Э_2$, $Э_{32}$), не обладая целостным представлением о системе. В данном контексте бизнес-архитектура рассматривается как инструмент упорядочивания бизнес-процессов, ролей и коммуникаций, а корпоративная архитектура – как механизм интеграции бизнес-логики с ИТ-ландшафтом и финансовой моделью организации. Эксперты подчеркивали, что *«без документирования*

самих процессов, организационной и финансовой структуры в целом цифровизация превращается в хаотичную автоматизацию» ($Э_4$, $Э_7$, $Э_{21}$, $Э_{23}$, $Э_{24}$, $Э_{33}$), и это существенно снижает уровень цифровой зрелости.

Отдельной проблемой эксперты ($Э_1$, $Э_7$, $Э_{13}$, $Э_{30}$, $Э_{34}$) назвали недостаточный уровень культуры работы с данными при реализации проектов. Во многих продуктовых командах решения принимаются интуитивно или на основе локального опыта, а данные используются фрагментарно – преимущественно для отчетности, а не для управления. Архитекторы и технические лидеры ($Э_1$–$Э_{15}$, $Э_{16}$, $Э_{21}$–$Э_{25}$, $Э_{29}$, $Э_{32}$) отмечали, что даже при наличии развитых систем мониторинга и сбора данных организации испытывают трудности с формированием корректных технических метрик и их привязкой к бизнес-результатам. По выражению одного из экспертов, «*данные есть, но нет привычки на них опираться – метрики в целом собирают, но потому что «так надо», а не поскольку они влияют на решения»* ($Э_{29}$). Это ограничивает возможности использования архитектуры как инструмента обоснования управленческих решений и выстраивания диалога с бизнесом.

По итогам экспертных интервью были выявлены шесть основных проблем реализации архитектурной практики в компаниях: формальная цифровая зрелость, переусложненная ИТ-архитектура, отсутствие системной работы с архитектурными данными, ролевые конфликты, а также позднее подключение специалистов по информационной безопасности к ИТ-проектам. По мнению опрошенных экспертов, решение указанных проблем связано с необходимостью смещения фокуса с формального моделирования архитектуры и подготовки отчетности на развитие значимых архитектурных практик. В условиях, когда оценка цифровой зрелости осуществляется «для отчета» и не подкреплена реальным управленческим запросом, архитектурные решения не оказывают влияния на стратегическое развитие организаций и не формируют приоритетные направления развития. Это, в свою очередь, требует включения архитектурных показателей в управленческие и финансовые контуры организаций.

Усложнение архитектуры, обусловленное ориентацией на проектирование «на будущее» и страхом изменений, может быть снижено за счет постепенного, инкрементального развития, ориентированного на текущие бизнес-потребности и измеримые эффекты, а не на абстрактные целевые модели. Отсутствие системной работы с архитектурными данными, проявляющееся в нехватке единого терминологического аппарата и закрепленной ответственности за данные, требует внедрения базовых практик управления данными, включая распределение ответственности, согласование понятий и использование архитектурных репозиториев как источника поддержки принятия решений. В конечном счете данные меры позволят снизить дублирование и количество ошибок, повысить прозрачность архитектуры и трансформировать ее из формального описания в инструмент поддержки управленческих решений.

Вместе с тем совершенствование архитектурных практик на уровне моделей, данных и процессов не устраняет ключевого противоречия, связанного с восприятием роли ИТ-архитектора внутри команд. Отношение к данной роли со стороны аналитиков, менеджеров и разработчиков продолжает оставаться неоднозначным ($Э_{16}$–$Э_{30}$). С одной стороны, архитекторы воспринимаются как носители системного мышления и *«люди, которые делают все для удерживания целостности решения»* ($Э_{16}$). С другой стороны, респонденты указывали неоднократно на их оторванность от процессов разработки и эксплуатации решений ($Э_{15}$, $Э_{23}$, $Э_{24}$, $Э_{29}$). Эксперт-аналитик ($Э_{17}$) отметил, что граница между аналитической и архитектурной функциями часто размыта, а один из разработчиков ($Э_{28}$) подчеркнул: *«архитектор появляется с диаграммами, но не всегда бывает, что остается с командой, и вот в этот момент начинаются реальные проблемы»*. В то же время все группы экспертов сошлись во мнении, что при отсутствии архитектора нагрузка по проектированию архитектуры системы ложится на наиболее опытных разработчиков, что снижает устойчивость решений.

Характер восприятия роли ИТ-архитектора во многом определяется не только особенностями проектной практики, но и более широким организационным и культурным контекстом, в котором функционируют ИТ-команды. Эксперты как из российских, так и из международных компаний подчеркивали различия в управленческих культурах и подходах к архитектурной деятельности ($Э_4$, $Э_9$, $Э_{15}$, $Э_{21}$, $Э_{24}$, $Э_{30}$). В международных организациях архитектурная практика, как правило, бо-

лее формализована, процессы принятия решений прозрачны и устойчивы во времени. В российских компаниях, по мнению респондентов ($Э_{15}$, $Э_{24}$), в большей степени выражен проектный и «ручной» подход, при котором значительная часть процессов зависит от конкретных специалистов. При этом эксперты отмечают, что *«в России умеют быстро делать сложные решения в условиях неопределенности, но реже компании и люди инвестируют в системность и документацию»* ($Э_{29}$). Указанные различия непосредственно влияют на роль и восприятие ИТ-архитектора в организациях.

Говоря о перспективах развития профессии, большинство экспертов сошлись во мнении, что роль ИТ-архитектора будет смещаться от *«рисования схем»* ($Э_7$, $Э_{11}$, $Э_{12}$, $Э_{15}$) к работе с неопределенностью, а также к усилению значимости коммуникаций и принятия решений. Генеративный искусственный интеллект уже применяется при анализе технологий и подготовке черновых решений, однако не заменяет архитектурное и стратегическое мышление ИТ-специалистов. Как отметили участники интервью ($Э_7$–$Э_{10}$, $Э_{14}$), *«можно ускорить работу с искусственным интеллектом, но нельзя посредством него договориться с представителями бизнес-подразделений, информационной безопасности и эксплуатации в одно и то же время»*. Эксперты ($Э_1$, $Э_3$, $Э_4$, $Э_7$, $Э_{14}$, $Э_{36}$, $Э_{39}$) полагают, что в перспективе ИТ-архитекторы будут все в большей степени выступать в роли интеграторов знаний и фасилитаторов ИТ-решений, а не только источников экспертизы.

Представленные экспертные оценки будущей роли ИТ-архитектора концептуально отражены в модели зрелости архитектора предприятия (*рис. 4*), иллюстрирующей этапы эволюции данной роли по мере структурирования операционной деятельности и роста значения цифровых технологий в организации. По мере повышения зрелости ИТ-функции акцент смещается от выполнения вспомогательных задач и сервисных операций к участию ИТ-архитектора в стратегических изменениях и формировании новых бизнес-возможностей. Данная модель позволяет проследить трансформацию профессиональной роли, а также определить логику подготовки и развития ИТ-архитекторов.

Разработанная модель демонстрирует прямую зависимость между восприятием роли архитектора предприятия и уровнем организационной зрелости.

Результаты экспертных интервью показали, что целесообразность использования тех или иных архитектурных каркасов и практик определяется не только их методологическими особенностями, но и степенью зрелости организационной среды, в которой они внедряются. Ключевое значение в данном случае имеют уровень формализации процессов управления, наличие выделенной архитектурной функции, степень интеграции подразделений, масштаб и сложность ИТ-ландшафта, а также уровень подготовки и профессионального взаимодействия специалистов. В качестве концептуальной основы для интерпретации зрелости организации может рассматриваться модель CMMI (Capability Maturity Model Integration), предполагающая последовательный переход организаций от фрагментарных и неформализованных процессов к управляемым, стандартизированным и оптимизируемым практикам управления.

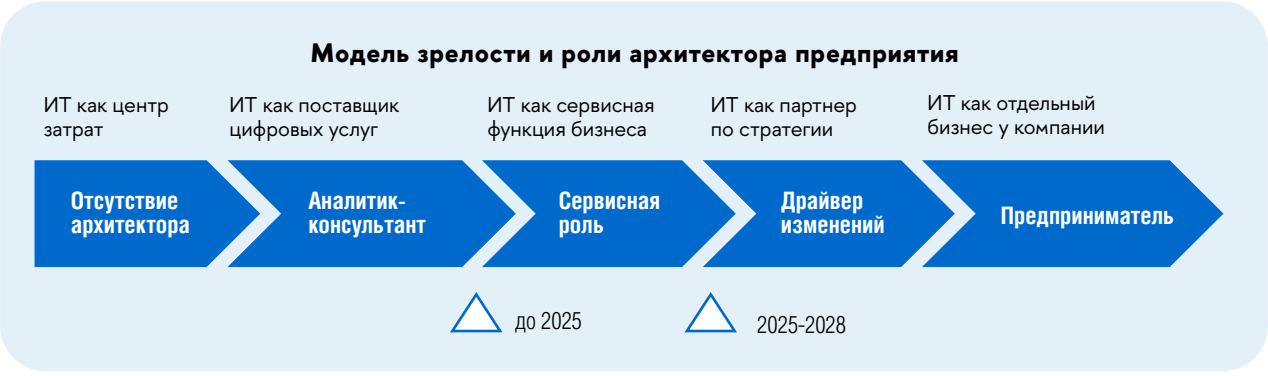


Рис. 4. Модель зрелости архитектора предприятия и его роли на разных этапах.

В ходе исследования было установлено, что применение архитектурных подходов в организациях с низким уровнем зрелости нередко носит фрагментарный или формальный характер. В подобных условиях архитектурные каркасы используются преимущественно как инструменты отчетности или локального моделирования, не будучи интегрированными в процессы принятия решений и управления изменениями. Подобная ситуация во многом может соответствовать начальным уровням зрелости CMMI, при которых процессы остаются слабо формализованными и зависят преимущественно от индивидуальных практик специалистов. Напротив, в организациях с более высоким уровнем зрелости архитектурные практики могут быть присоединены как части системы корпоративного управления, обеспечивая в том числе согласованность между бизнес-целями, процессами и ИТ-ландшафтом.

Эксперты также отмечали о том, что различные архитектурные подходы задают неодинаковые требования к организационной структуре и степени проработанности бизнес-процессов. Так, использование комплексных архитектурных каркасов (например, TOGAF или UAF) требует устойчивых механизмов межролевого взаимодействия, части формализованных процедур управления и наличия культуры документирования. В то же время в менее зрелых организациях чаще применяются локальные и упрощенные практики моделирования, которые больше ориентированы на решение отдельных прикладных задач. По мере роста зрелости архитектурная деятельность постепенно переходит от изолированного проектирования решений к системному управлению изменениями и поддержке стратегического развития.

Уровень организационной зрелости во многом определяется профессиональным опытом специалистов, вовлеченных в архитектурную деятельность, а также широтой их профессионального кругозора. Это обусловливает необходимость рассмотрения особенностей формирования архитектурных компетенций и подходов к их развитию.

Представители научного и профессионального сообщества ($Э_1$–$Э_{15}$, $Э_{31}$–$Э_{39}$) подчеркнули, что обучение корпоративной архитектуре наиболее эффективно при наличии у специалиста опыта управления процессами или ИТ-системами. В этом случае архитектура предприятия будет рассматриваться не как совокупность нотаций, а как инструмент системного мышления, охватывающий бизнес, процессы, технологии и финансовые аспекты. Эксперты ($Э_{33}$, $Э_{36}$, $Э_{37}$) отметили, что *«навыкам архитектуры имеет смысл учиться не в начале карьеры, а тогда, когда человек столкнулся с потолком в профессиональной реализации и ростом системной сложности проектов»*. В то же время достоинствами современного обучения техническим специальностям эксперты ($Э_{32}$, $Э_{34}$, $Э_{35}$, $Э_{38}$, $Э_{39}$) назвали междисциплинарность, ориентацию на реальные задачи и использование методов моделирования различных систем.

В условиях цифровизации образовательной среды, включая программы дополнительного профессионального образования, роль преподавателей и наставников из профессиональной среды трансформируется и все чаще сводится к функции модератора образовательного процесса на онлайн-платформах, помогающего ориентироваться в избыточном информационном потоке. Как отмечено в работе [30], такие курсы не решают проблему «узкого» профессионального видения, при котором техническая подготовка ИТ-архитекторов не сопровождается пониманием рыночного и организационного контекста, вопросов коммерциализации решений и их защиты как объектов интеллектуальной собственности. Дополнительным вызовом является переизбыток специалистов начального уровня на ИТ-рынке, прежде всего после краткосрочных курсов, чьи фрагментарные компетенции не соответствуют требованиям вакансий [31]. Это усиливает потребность в междисциплинарной и практико-ориентированной подготовке ИТ-архитекторов. Указанные тенденции в сфере подготовки специалистов непосредственно отражаются на состоянии уровня зрелости архитектурной деятельности в организациях и качестве принимаемых решений.

Таким образом, результаты исследования показали, что эффективность корпоративной ИТ-архитектуры определяется не столько используемыми технологиями и каркасами, сколько зрелостью организационных процессов, качеством ролевого взаимодействия и механизмами управления.

Заключение

Проведенное исследование, основанное на анализе экспертных интервью, позволило комплексно рассмотреть практику реализации кор-

поративной ИТ-архитектуры в современных организациях. Полученные результаты показывают, что ключевые проблемы эффективности корпоративной ИТ-архитектуры обусловлены не технологическими ограничениями, а особенностями организационного устройства, корпоративной культуры, механизмов управления и распределения ролей между участниками архитектурной деятельности. Экспертные оценки также свидетельствуют о том, что архитектура предприятия во многих случаев используется формально, без устойчивой интеграции в процессы управления и принятий решений, что снижает ее практическую ценность.

Первая гипотеза о том, что ключевые проблемы эффективности корпоративной ИТ-архитектуры предприятия связаны не с технологическими ограничениями, а с несогласованностью архитектурных практик и организационных процессов, получила подтверждение. Экспертные интервью показали, что формальное применение архитектурных подходов, их слабая интеграция в управленческие процессы и наличие внутренних ограничений существенно снижают их практическую ценность.

Вторая гипотеза, связанная с влиянием зрелости ролевого взаимодействия на эффективность архитектурной деятельности, также подтвердилась. Установлено, что отсутствие четкого распределения ответственности, размытость ролей и конфликты между участниками проектов снижают устойчивость архитектурных решений и препятствуют использованию архитектуры как интеграционного механизма.

Третья гипотеза о формальном характере применения архитектурных каркасов и моделей вследствие их слабой интеграции в управленческие и операционные контуры организации также получила эмпирическое подтверждение в ходе исследования. Результаты показали, что использование архитектурных артефактов в виде изолированной документации низкой степени формализации и структурированности, не связанной с ключевыми процессами принятия решений, существенно ограничивает влияние архитектуры на результаты цифровой трансформации.

В рамках исследования сформированы аналитические артефакты, обеспечивающие возможность независимого анализа и повторного использования результатов, включая: визуализацию динамики поисковых запросов по теме архитектуры предприятия и цифровой трансформации, анализ научной активности в предметной области, а также сравнительную интерпретацию восприятия архитектурных подходов различными группами специалистов. Кроме того, построена причинно-следственная модель выявленных проблем, представленная в форме диаграммы Исикавы. Отличительной особенностью сформированных артефактов является их ориентация не только на описание архитектурных подходов, и на сопоставление организационных, ролевых и управленческих факторов, влияющих на результативность архитектурной деятельности. При сравнении с существующими исследованиями, данные артефакты основаны на сопоставлении экспертных оценок представителей разных профессий и ролей, что позволило выявить системные противоречия архитектурной практики. Данные модели и визуализации можно использовать для последующего анализа зрелости практик архитектуры, оценки организационных ограничений и интерпретации процессов цифровой трансформации в организациях различного типа.

Полученные результаты позволяют рассмотреть реальные архитектурные практики через призму восприятия различных профессиональных ролей. В отличие от исследований, ориентированных преимущественно на теоретические аспекты, в работе сделан акцент на сопоставлении экспертных оценок и выявлении системных противоречий, возникающих при применении архитектурного подхода в организациях. Выявленные закономерности могут быть использованы для совершенствования процессов управления архитектурой, системного повышения уровня их зрелости, развития ролевого взаимодействия и интеграции архитектурных подходов в управленческие контуры организаций.

В заключение отметим, результаты данного исследования подтвердили необходимость действий по смещению фокуса развития архитектуры предприятия с технологического уровня на организационный и управленческий, что предполагает усиление роли архитектурной методологии в процессе принятий решений, развитие процессов, а также переосмысление методических подходов к подготовке ИТ-архитекторов. ■

Литература

1. Якимов Н. А. Влияние корпоративного управления, структуры собственности и финансовой архитектуры на стратегическую эффективность компаний // Мир экономики и управления. 2023. Т. 23. № 4. С. 136–149. https://doi.org/10.25205/2542-0429-2023-23-4-136-149

2. Кочина С. К., Щетинина Е. Д. Стратегическая диагностика степени гармоничности бизнес-архитектуры промышленного предприятия // Общество: политика, экономика, право. 2023. № 7. С. 57–66. https://doi.org/10.24158/pep.2023.7.7

3. Potts M. W., Sartor P., Johnson A., Bullock S. A network perspective on assessing system architectures: foundations and challenges // Systems Engineering. 2019. Vol. 22. No. 6. P. 485–501. https://doi.org/10.1002/sys21519

4. Reina D. S. How top CIOs drive better digital results // Gartner. 2025. [Электронный ресурс]: https://www.gartner.com/en/articles/digital-results (дата обращения: 26.07.2026).

5. Кудрявцев Д. В., Арзуманян М. Ю. Архитектура предприятия: переход от проектирования ИТ-инфраструктуры к трансформации бизнеса // Российский журнал менеджмента. 2017. Т. 15. № 2. С. 193–224. http://doi.org/10.21638/11701/spbu18.2017.204

6. Ильин И. В., Левина А. И., Борреманс А. Д., Калязина С. Е. Мета-модель архитектуры предприятия в цифровую эпоху // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 3(105). С. 36–40.

7. Юхно А. С. Совет директоров организации и корпоративное управление информационно-коммуникационными технологиями: новая парадигма корпоративных отношений // Управленческие науки. 2022. Т. 12. № 1. С. 17–31. https://doi.org/10.26794/2304-022X-2022-12-1-17-31

8. Gong Y., Yang J., Shi X. Towards a comprehensive understanding of digital transformation in government: Analysis of flexibility and enterprise architecture // Government Information Quarterly. 2020. Vol. 37. No. 3. Art. 101487. https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101487

9. Kurnia S., Kotusev S., Shanks G., Dilnutt R., Taylor P., Milton S. Enterprise architecture practice under a magnifying glass: linking artifacts, activities, benefits, and blockers // Communications of the Association for Information Systems. 2021. Vol. 49. No. 1. P. 668–698. https://doi.org/10.17705 /1CAIS.04936

10. Kotusev S., Kurnia S., Dilnutt R. Enterprise architecture artefacts as instruments for knowledge management: a theoretical interpretation // Knowledge Management Research & Practice. 2023. Vol. 21. No. 3. P. 594–606. https://doi.org/10.1080/14778238.2021.1999183

11. Dimitriu D., Popescu M. A.-M. Enterprise Architecture Framework Design in IT Management // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 46. P. 932–940. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.011

12. Абрамов В. И., Борзов А. В., Семенов К. Ю. Оценка готовности малых и средних предприятий к цифровой трансформации // Вопросы инновационной экономики. 2022. № 3. С. 1573–1596. https://doi.org/10.18334/vinec.12.3.115000

13. Брусакова И. А. Методы и модели оценки цифровой зрелости инновационной структуры // Управленческие науки. 2019. Т. 9. № 2. С. 56–63. https://doi.org/10.26794/2304-022X-2019-9-3-56-62

14. Haki K., Legner C. The mechanics of enterprise architecture principles // Journal of the Association for Information Systems. 2021. Vol. 22. No. 5. P. 1334–1375. https://doi.org/10.17705/ 1jais.00696

15. Анисифоров А. Б., Дубгорн А. С. Научные принципы развития архитектуры информационных систем и их реализация в управлении организационно-экономическими преобразованиями на предприятии // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2019. № 4. С. 31–40. http://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-31-40

16. Валеев С. С., Кондратьева Н. В., Мельников А. В. Архитектура предприятия и архитектура нулевого доверия // Вестник УрФО. 2023. № 2(48). С. 49–53. http://doi.org/10.14529/ secur230204

17. Юрьев Р. Н., Бессмертный И. А., Груздева А. С. Информационные и правовые аспекты управления бизнес-процессами в цифровой экономике // Экономика. Право. Инновации. 2023. № 1. С. 55–62. http://doi.org/10.17586/2713-1874-2023-1-55-62

18. Trad A. The business transformation framework and enterprise architecture framework for managers in business innovation: An applied holistic mathematical model // International Journal of Service Science, Management, Engineering and Technology. 2021. Vol. 12. No. 1. P. 142–181. http://doi.org/10.4018/IJSSMET.20210101.oa1

19. Чернова Ж. В. Методологические аспекты экспертных интервью: подходы, возможности и ограничения // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. 2023. № 5(177). С. 74–90. http://doi.org/10.14515/monitoring.2023.5.2418

20. Döringer S. The problem-centred expert interview. Combining qualitative interviewing approaches for investigating implicit expert knowledge // International Journal of Social Research Methodology. 2021. Vol. 24. No. 3. P. 265–278. https://doi.org/10.1080/13645579.2020.1766777

21. Anas N., Ishaq K. Qualitative research method in social and behavioural science research // International Journal of Management, Social Sciences, Peace and Conflict Studies. 2022. Vol. 5. No. 1. P. 89–93. https://www.ijmsspcs.com/index.php/IJMSSPCS/article/view/319/346

22. Рассел Дж. Диаграмма Исикавы. М: VSD, 2013.

23. Enterprise Architecture // Google Trends. [Электронный ресурс]: https://trends.google.com/explore?q=Enterprise%20Architecture&date=all&geo=Worldwide (дата обращения: 20.01.2026).

24. Digital Transformation // Google Trends. [Электронный ресурс]: https://trends.google.com/explore?q=Digital%20Transformation%20&date=all&geo=Worldwide (дата обращения: 20.01.2026).

25. Enterprise Architecture // Яндекс Вордстат. [Электронный ресурс]: https://wordstat.yandex.ru/?%20=&region=all&view=graph&words=Enterprise%20Architecture (дата обращения: 21.01.2026).

26. Digital Transformation // Яндекс Вордстат. [Электронный ресурс]: https://wordstat.yandex.ru/?%20=&region=all&view=graph&words=Digital%20Transformation%20 (дата обращения: 21.01.2026).

27. Enterprise Architecture // The Lens. [Электронный ресурс]: https://www.lens.org/lens/search/scholar/analysis?q=Enterprise%20Architecture (дата обращения: 16.12.2025).

28. Шмонин М. А. Эффективность подхода «Архитектура как код» в управлении ИТ-архитектурой предприятия // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. № 3. С. 42–54. https://doi.org/10.35330/1991-6639-2024-26-3-42-54

29. Krunic M. Documentation as code in automotive system/software engineering // Elektronika Ir Elektrotechnika. 2023. Vol. 29. No. 4. P. 61–75. https://doi.org/10.5755/j02.eie.33843

30. Осокина Е. В. Интеграция бизнес-образования в подготовку ИТ-специалистов // Вестник Шадринского государственного педагогического университета. 2023. № 4(60). С. 102–109. https://doi.org/10.52772/25420291_2023_4_102

31. Надеждина С. Д., Чистяков А. А., Чистякова О. А. Трансформация рынка труда и запрос на новый тип ИТ-специалистов в тренде цифровой экономики // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. 2024. № 1(31). С. 84–94. https://doi.org/10.21603/2500-3372-2024-9-1-84-94

Об авторах

Руслан Исламович Мамедгулиев

аспирант, кафедра инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф;

Email: mamedguliev-ruslan2000@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-2546-3971

Ольга Анатольевна Цуканова

доктор экономических наук;

профессор, кафедра информационных систем в экономике, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9;

Email: zoa1999@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9442-2268

Research and analysis of approaches and views of IT specialists on the system, corporate and business architecture of the enterprise: trends, challenges, development prospects

Ruslan Islamovich Mamedguliev [a]
Email: mamedguliev-ruslan2000@yandex.ru

Olga Anatolievna Tcukanova [b]
Email: zoa1999@mail.ru

[a] Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia
[b] Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Abstract

In the practice of managing organizations and information systems the role of corporate architecture as a tool for ensuring the integrity and manageability of digital change is increasing, but its actual application is often formal and does not lead to sustainable management effects. The purpose of this study is to analyze the practices of applying the corporate IT architecture of an enterprise in the context of digital transformation of organizations at the Russian and international levels, as well as to identify the factors determining its effectiveness. The research was carried out within the framework of a qualitative approach and is based on the results of 39 expert interviews with IT architects, system and business analysts, developers, project managers and representatives of the academic community. The use of the expert interview method made it possible to identify not only the formal aspects of using architectural approaches, but also the peculiarities of their perception by various professional roles. The results showed that the key problems of corporate architecture effectiveness are caused not so much by technological limitations or disadvantages of the frameworks used, but rather by the level of organizational maturity, the quality of role interaction, and the degree of integration of architectural activities into management and operational processes. It has been established that in conditions of low maturity, architectural approaches are applied fragmentarily and mainly in the form of isolated documentation, whereas at a higher level of maturity they become a tool for decision support and change management. Based on the analysis of expert assessments, the main problems of architectural practice implementation have been identified and ways to overcome them have been proposed, including shifting the focus from formal modeling to the development of managerial and organizational mechanisms. In addition, the need for the formation of architectural competencies at later stages of professional development of specialists, with practical experience in working with processes and IT systems, is substantiated.

Keywords: architectural committees, architecture management, business architecture, corporate architecture, cybersecurity of IT systems, enterprise architecture expert interviews, foresight forecasting, IT architecture design, qualitative research, system architecture

Citation: Mamedguliev, R. I., & Tcukanova, O. A. (2026). Research and analysis of approaches and views of IT specialists on the system, corporate and business architecture of the enterprise: trends, challenges, development prospects. *Business Informatics, 20*(3), 69–89. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.69.89

References

1. Yakimov, N. A. (2023). Vliyanie korporativnogo upravleniya, struktury sobstvennosti i finansovoy arkhitektury na strategicheskuyu effektivnost' kompaniy [The impact of corporate governance, ownership structure and financial architecture on the strategic effectiveness of companies]. *Mir ekonomiki i upravleniya* [The World of Economics and Management], *23*(4), 136–149. https://doi.org/10.25205/2542-0429-2023-23-4-136-149

2. Kochina, S. K., & Shchetinina, E. D. (2023). Strategicheskaya diagnostika stepeni garmonichnosti biznes-arkhitektury promyshlennogo predpriyatiya [Strategic diagnostics of the degree of harmony of the business architecture of an industrial enterprise]. *Obshchestvo: politika, ekonomika, pravo* [Society: Politics, Economics, Law], *7*(120), 57–66. https://doi.org/10.24158/pep.2023.7.7

3. Potts, M. W., Sartor, P., Johnson, A., & Bullock, S. (2019). A network perspective on assessing system architectures: foundations and challenges. *Systems Engineering, 22*(6), 485–501. https://doi.org/10.1002/sys21519

4. Gartner (2025). *How top CIOs drive better digital results.* https://www.gartner.com/en/articles/digital-results

5. Kudryavtsev, D. V., & Arzumanyan, M. Yu. (2017). Arkhitektura predpriyatiya: perekhod ot proektirovaniya IT-infrastruktury k transformatsii biznesa [Enterprise Architecture: the transition from IT infrastructure design to business transformation]. *Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta* [Russian Journal of Management], *15*(2), 193–224. https://doi.org/10.21638/11701/spbu18.2017.204

6. Ilyin, I. V., Levina, A. I., Borremans, A. D., & Kalyazina, S. E. (2020). Meta-model' arkhitektury predpriyatiya v tsifrovuyu epokhu [Meta-Model of Enterprise Architecture in the Digital Era]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Development Paths], *3*(105), 36–40.

7. Yukhno, A. S. (2022). Sovet direktorov organizatsii i korporativnoe upravlenie informatsionno-kommunikatsionnymi tekhnologiyami: novaya paradigma korporativnykh otnosheniy [The Board of Directors of the organization and corporate governance of information and communication technologies: a new paradigm of corporate relations]. *Upravlencheskie nauki* [Management Sciences], *12*(1), 17–31. https://doi.org/10.26794/2304-022X-2022-12-1-17-31

8. Gong, Y., Yang, J., & Shi, X. (2020). Towards a comprehensive understanding of digital transformation in government: Analysis of flexibility and enterprise architecture. *Government Information Quarterly, 37*(3), 101487. https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101487

9. Kurnia, S., Kotusev, S., Shanks, G., Dilnutt, R., Taylor, P., & Milton, S. (2021). Enterprise architecture practice under a magnifying glass: linking artifacts, activities, benefits, and blockers. *Communications of the Association for Information Systems, 49*(1), 668–698. https://doi.org/10.17705 /1CAIS.04936

10. Kotusev, S., Kurnia, S., & Dilnutt, R. (2023). Enterprise architecture artefacts as instruments for knowledge management: a theoretical interpretation. *Knowledge Management Research & Practice, 21*(3), 594–606. https://doi.org/10.1080/14778238.2021.1999183

11. Dimitriu, D., & Popescu, M. A.-M. (2020). Enterprise architecture framework design in IT management. *Procedia Manufacturing, 46*, 932–940. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.011

12. Abramov, V. I., Borzov, A. V., & Semyonov, K. Yu. (2022). Otsenka gotovnosti malykh i srednikh predpriyatiy k tsifrovoy transformatsii [Assessment of the readiness of small and medium-sized enterprises for digital transformation]. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Issues of Innovative Economy], *12*(3), 1573–1596. https://doi.org/10.18334/vinec.12.3.115000

13. Brusakova, I. A. (2019). Metody i modeli otsenki tsifrovoy zrelosti innovatsionnoy struktury [Methods and models for assessing the digital maturity of an innovation structure]. *Upravlencheskie nauki* [Management Sciences], *9*(2), 56–63. https://doi.org/10.26794/2304-022X-2019-9-3-56-62

14. Haki, K., & Legner, C. (2021). The mechanics of enterprise architecture principles. *Journal of the Association for Information Systems, 22*(5), 1334–1375. https://doi.org/10.17705/ 1jais.00696

15. Anisiforov, A. B., & Dubgorn, A. S. (2019). Nauchnye printsipy razvitiya arkhitektury informatsionnykh sistem i ikh realizatsiya v upravlenii organizatsionno-ekonomicheskimi preobrazovaniyami na predpriyatii [Scientific Principles for the Development of Information Systems Architecture and Their Implementation in Managing Organizational and Economic Transformations at an Enterprise]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya "Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment"* [ITMO University Journal. Series "Economics and Environmental Management"], (4), 31–40. https://doi.org/10.17586/2310-1172-2019-12-4-31-40

16. Valeev, S. S., Kondratyeva, N. V., & Melnikov, A. V. (2023). Arkhitektura predpriyatiya i arkhitektura nulevogo doveriya [Enterprise Architecture and Zero Trust Architecture]. *Vestnik UrFO* [Bulletin of the Ural Federal University], *2*(48), 49–53. https://doi.org/10.14529/secur230204

17. Yuryev, R. N., Bessmertnyy, I. A., & Gruzdeva, A. S. (2023). Informatsionnye i pravovye aspekty upravleniya biznes-protsessami v tsifrovoy ekonomike [Information and Legal Aspects of Business Process Management in the Digital Economy]. *Ekonomika. Pravo. Innovatsii* [Economics. Law. Innovations], (1), 55–62. https://doi.org/10.17586/2713-1874-2023-1-55-62

18. Trad, A. (2021). The Business Transformation Framework and Enterprise Architecture Framework for Managers in Business Innovation: An Applied Holistic Mathematical Model. *International Journal of Service Science, Management, Engineering and Technology, 12*(1), 142–181. http://doi.org/10.4018/IJSSMET.20210101.oa1

19. Chernova, Zh. V. (2023). Metodologicheskie aspekty ekspertnykh interv'yu: podkhody, vozmozhnosti i ogranicheniya [Methodological Aspects of Expert Interviews: Approaches, Opportunities and Limitations]. *Monitoring obshchestvennogo mneniya: ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny* [Monitoring of Public Opinion: Economic and Social Changes], *5*(177), 74–90. https://doi.org/10.14515/monitoring.2023.5.2418

20. Döringer, S. (2021). The problem-centred expert interview. Combining qualitative interviewing approaches for investigating implicit expert knowledge. *International Journal of Social Research Methodology, 24*(3), 265–278. https://doi.org/10.1080/13645579.2020.1766777

21. Anas, N., & Ishaq, K. (2022). Qualitative research method in social and behavioural science research. I*nternational Journal of Management, Social Sciences, Peace and Conflict Studies, 5*(1), 89–93. https://www.ijmsspcs.com/index.php/IJMSSPCS/article/view/319/346

22. Russell, J. (2013). *Diagramma Isikavy* [Ishikawa Diagram]. Moscow: VSD (in Russian).

23. Google Trends (2026). *Enterprise Architecture* (in Russian). https://trends.google.com/explore?q=Enterprise%20Architecture&date=all&geo=Worldwide

24. Google Trends (2026). *Digital Transformation* (in Russian). https://trends.google.com/explore?q=Digital%20Transformation%20&date=all&geo=Worldwide

25. Yandex Wordstat (2026). *Enterprise Architecture* (in Russian). https://wordstat.yandex.ru/?%20=&region=all&view=graph&words=Enterprise%20Architecture

26. Yandex Wordstat (2026). *Digital Transformation* (in Russian). https://wordstat.yandex.ru/?%20=&region=all&view=graph&words=Digital%20Transformation%20

27. The Lens (2026). *Enterprise Architecture*. https://www.lens.org/lens/search/scholar/analysis?q=Enterprise%20Architecture

28. Shmonin, M. A. (2024). Effektivnost' podkhoda «Arkhitektura kak kod» v upravlenii IT-arkhitekturoy predpriyatiya [Effectiveness of the «Architecture as a Code» approach in enterprise IT architecture management]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], (3), 42–54. https://doi.org/10.35330/1991-6639-2024-26-3-42-54

29. Krunic, M. (2023). Documentation as code in automotive system/software engineering. *Elektronika Ir Elektrotechnika, 29*(4), 61–75. https://doi.org/10.5755/j02.eie.33843

30. Osokina, E. V. (2023). Integratsiya biznes-obrazovaniya v podgotovku IT-spetsialistov [Integration of Business Education into IT Specialist Training]. *Vestnik Shadrinskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of Shadrinsk State Pedagogical University], *4*(60), 102–109. https://doi.org/10.52772/25420291_2023_4_102

31. Nadezhdina, S. D., Chistyakov, A. A., & Chistyakova, O. A. (2024). Transformatsiya rynka truda i zapros na novyy tip IT-spetsialistov v trende tsifrovoy ekonomiki [Transformation of the Labor Market and Demand for a New Type of IT Specialists in the Digital Economy Trend]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskie, sotsiologicheskie i ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic Sciences], *1*(31), 84–94. https://doi.org/10.21603/2500-3372-2024-9-1-84-94

About the authors

Ruslan Islamovich Mamedguliev

PhD student, Department of Innovation and Technology Entrepreneurship, Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU «LETI», 5, Professor Popova St., St. Petersburg 197022, Russia;

Email: mamedguliev-ruslan2000@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-2546-3971

Olga Anatolievna Tcukanova

Doctor of Science (Economics);

Professor, Department of Information Systems in Economics, Saint Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya Qy., St. Peterburg 199043, Russia;

Email: zoa1999@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9442-2268

DOI: 10.17323/2587-814X.2026.3.90.113

Математическая модель и методика оценки структурной наблюдаемости системы управления знаниями: практическая апробация в АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»

Павел Александрович Михненко [a]
Email: pmihnenko@bmstu.ru

Мария Васильевна Ермакова [a,b]
Email: ermakovamvv@mail.ru

[a] Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

[b] АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия

Аннотация

В условиях цифровой трансформации управление знаниями становится критическим фактором устойчивого развития организаций, однако состояние систем управления знаниями (СУЗ) часто остается слабоформализуемым и ненаблюдаемым. Существует пробел в научных разработках, связанный с отсутствием формализованных моделей, позволяющих на основе косвенных измерений диагностировать состояние СУЗ. Цель исследования – адаптация и апробация математического аппарата структурной наблюдаемости для диагностики латентных состояний СУЗ по ограниченному набору косвенных измерений на основе экспертных данных. Под наблюдаемостью в работе понимается структурная идентифицируемость статической модели измерений, позволяющая на основе структуры связей, заданной экспертом, однозначно восстановить вектор латентных состояний. Методология основана на принципах структурной наблюдаемости, экспертной верификации причинно-следственных связей между переменными состояния и применении взвешенного метода наименьших квадратов. Для повышения надежности оценивания выполнены редукция размерности матрицы связей (объ-

единение сильно коррелированных переменных) и калибровка весовой матрицы на основе анализа согласованности экспертных суждений. Основной научный результат состоит в адаптации методов структурного анализа, экспертной идентификации и линейного оценивания к задаче диагностики СУЗ и демонстрации возможности восстановления внутренних состояний СУЗ по ограниченному набору измерений с использованием экспертных данных. В ходе апробации модели на промышленном предприятии установлено, что ключевыми наблюдаемыми факторами СУЗ являются формализация знаний, интенсивность и культура обмена знаниями. Выявлены ограничения наблюдаемости поглощающей способности и актуальности знаний в рамках используемой системы измерений. Практическая значимость заключается в предоставлении организациям инструмента для количественного аудита СУЗ и оптимизации системы мониторинга на основе данных.

Ключевые слова: система управления знаниями, наблюдаемость, структурная идентифицируемость, структурная модель, экспертиза, латентные состояния, взвешенный метод наименьших квадратов, калибровка весовой матрицы, цифровая трансформация, организационная культура

Цитирование: Михненко П. А., Ермакова М. В. Математическая модель и методика оценки структурной наблюдаемости системы управления знаниями: практическая апробация в АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» // Бизнес-информатика. 2026. Т. 20. № 3. С. 90–113. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.90.113

Введение

В условиях цифровой трансформации и возрастающей сложности бизнес-среды управление знаниями становится критическим фактором устойчивого развития и конкурентного преимущества организаций. Современные предприятия вынуждены не только накапливать и систематизировать интеллектуальные активы, но и обеспечивать их эффективное преобразование в инновации, операционные улучшения и стратегические результаты. Однако сам процесс управления знаниями остается сложно формализуемым, часто опирающимся на латентные организационные механизмы и труднонаблюдаемые социально-психологические факторы.

Ключевой проблемой в данной области выступает парадокс наблюдаемости системы управления знаниями (СУЗ). Несмотря на внедрение информационных систем и растущий объем данных, такие параметры, как актуальность знаний, степень их формализации, интенсивность обмена, поглощающая способность организации и другие, остаются ненаблюдаемыми в реальном времени. В результате организации не могут объективно оценить отдачу от инвестиций в цифровые инструменты и эффективность использования интеллектуальных активов.

Проблема низкой наблюдаемости СУЗ является ключевым барьером для их эффективного внедрения и развития. Отсутствие измеримых индикаторов, отражающих внутреннее состояние системы, ее способность к усвоению новых знаний и уровень интеграции в бизнес-процессы, порождает стратегические риски, «слепое» администрирование и потерю инновационного потенциала. Это приводит к тому, что управленческие решения в области знаний зачастую принимаются интуитивно или на основе фрагментарных данных, снижая прогнозируемость и управляемость данного ресурса.

Актуальность исследования определяется необходимостью перехода от качественного описания СУЗ к формализованным моделям, позволяющим диагностировать их состояние, выявлять скрытые угрозы и обоснованно выбирать управляющие воздействия. Реализация данного подхода требует синтеза методов теории управления, системного анализа и экспертных оценок, адаптированных к специфике знаний как объекта управления.

Цель исследования – адаптация и апробация математического аппарата структурной наблюдаемости для диагностики латентных состояний СУЗ по ограниченному набору косвенных измерений на основе экспертных данных. Под структурной наблюдаемостью в рамках статической задачи диагностики понимается структурная идентифицируемость модели измерений – свойство, позволяющая на основе структуры связей, заданной экспертом, однозначно восстановить вектор состояния системы методом взвешенных наименьших квадратов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих подходов к моделированию СУЗ и обосновать выбор подхода к оценке наблюдаемости.
2. Формализовать пространство состояний (латентные факторы) и определить вектор измерений СУЗ.
3. Разработать математическую модель статической структурной наблюдаемости СУЗ.
4. Построить модель взаимовлияния переменных состояния СУЗ на основе экспертных оценок.
5. Оценить параметры модели измерений: вектор измерений и матрицу репрезентативности.
6. Разработать процедуры предобработки экспертных данных, включая анализ мультиколлинеарности и калибровку весовой матрицы на основе согласованности суждений.
7. Провести практическую апробацию предложенного подхода для оценки наблюдаемости СУЗ на примере АО «Объединенная двигателестроительная корпорация».
8. Сопоставить разработанную модель с существующими методами диагностики организационных систем (факторный анализ, SEM/PLS-модели, методы аудита управления знаниями, многокритериальные экспертные методы) для позиционирования ее научной новизны как адаптации и синтеза аппарата структурной наблюдаемости и экспертного оценивания к задачам диагностики СУЗ.

1. Обзор литературы

1.1. Основные аспекты исследования СУЗ

Эмпирические исследования подтверждают положительное влияние создания и обмена знаниями на инновационный потенциал, однако его характер варьируется в зависимости от контекста: внедрение знаний не всегда связано с инновационной деятельностью [1], в банковском секторе выявлены нелинейные эффекты [2]. Формирование стратегии управления знаниями повышает устойчивость и конкурентоспособность организации [3], а интеграция практик СУЗ с управлением рисками повышает эффективность проектов [4]. Влияние управления знаниями на эффективность организации усиливается готовностью к изменениям, при этом индивидуальная поддержка сотрудников дает более высокий прямой эффект, чем организационная [5]. Эффективность СУЗ требует интеграции с управлением человеческими ресурсами, где комплементарные конфигурации стратегий («кодификация – контроль» и «персонализация – приверженность») способствуют использованию стратегических ресурсов [6]. Внедрение Индустрии 4.0 требует ситуационного подхода к выбору стратегии СУЗ [7]; цифровая трансформация способствует инновациям через рекомбинацию знаний, а компетентность руководства усиливает этот эффект [8]; в ИТ-индустрии все компоненты СУЗ положительно влияют на успех, а развитие предпринимательства в сфере знаний выступает модератором [9].

Высокая эффективность достигается при интеграции СУЗ в бизнес-процессы («прозрачное управление знаниями») [10]; инструментом реализации выступают карты знаний, визуализирующие экспертный профиль сотрудников [11]. На малых и средних предприятиях эффективность СУЗ зависит от ИТ-поддержки, децентрализации и развития Т-образных компетенций [12]; управление организационным забыванием требует структурирования и оценки знаний [13]. В высокотехнологичных компаниях ключевые факторы успеха – поддержка руководства, культура и вовлеченность персонала [14]; реализация СУЗ требует капитализации знаний для формирования интеллектуального капитала [15]. Ценность знаний определяется их использованием в трудовых функциях [16]; в кросс-функциональных командах ключевой фактор обмена – внутренняя

мотивация, а не организационные стимулы [17]; технологии коллективного интеллекта позволяют управлять процессами в условиях творческой деятельности [18].

Когнитивный менеджмент и большие языковые модели (LLM) открывают новые возможности, выступая интеллектуальными ассистентами, однако их применение ограничено «технологической границей» [19, 20]; технической основой становятся гибридные когнитивно-реляционные СУБД [21]. Опыт российского банка демонстрирует использование интеллектуальных ассистентов для подбора персонала, обучения и аналитики [22]. В контексте цифровой трансформации СУЗ способствует готовности персонала к инновациям, требуя новой корпоративной культуры и компетенций [23]. В российской практике практики управления талантами усиливают поглощающую способность компаний [24], а образовательные организации используют уникальный набор практик, отличный от западных моделей [25].

Проведенный анализ выявил многоаспектность проблемы управления знаниями и существенный разрыв между декларируемой значимостью СУЗ и возможностями их объективной диагностики, что подтверждает актуальность разработки новых оценочных инструментов, основанных на принципах структурной наблюдаемости.

1.2. Классификация моделей СУЗ

Обзор литературы позволил сформулировать ряд взаимосвязанных определений понятия «Система управления знаниями организации». Следует подчеркнуть, что отбор источников целенаправленно не ограничивался работами, узко посвященными типологии СУЗ как организационно-технологических комплексов. Напротив, в фокус анализа попали исследования, рассматривающие управление знаниями в более широком организационно-управленческом контексте – как элемент стратегического планирования, управления инновациями, человеческими ресурсами и цифровой трансформации организации. Такой подход был выбран ввиду того, что он позволяет выявить не только декларируемые в контексте ценности СУЗ, но и проявляющиеся на практике (латентные) аспекты управления знаниями. Основной задачей стало обнаружение в этих работах имплицитных признаков и характерных черт, которые в своей совокупности позволяют обосновать выделение различных моделей СУЗ. Результатом анализа стала следующая классификация, отражающая многоаспектность управления знаниями в организациях (*табл. 1*).

На основе представленной классификации и в контексте рассмотрения СУЗ с позиций общей теории систем и теории управления, автора-

Таблица 1.

Классификация моделей СУЗ

Тип модели	Определение	Функции	Уникальность	Источники
Стратегическая модель	Подсистема стратегического управления, обеспечивающая достижение долгосрочных конкурентных преимуществ и стратегических целей компании за счет интеграции процессов управления знаниями с инновационной деятельностью и системой оценки эффективности.	Создание, интеграция и реализация знаний, поддержка принятия стратегических решений, оценка результатов.	СУЗ как стратегический актив для обеспечения устойчивого конкурентного преимущества, инноваций и адаптации в условиях глобальных изменений.	[1, 7]
Модель организационных способностей	Функциональная система развития, предназначенная для формирования и усиления ключевых мета-способностей организации, позволяющих ей эффективно приобретать, создавать, совмещать и применять знания.	Организационное обучение, организационная гибкость, поглощающая способность.	Смещение фокуса с операционных процессов на развитие высокоуровневых динамических способностей организации, обеспечивающих ее гибкость и умение работать с новыми знаниями.	[26]

Тип модели	Определение	Функции	Уникальность	Источники
Организационно-инфраструктурная модель	Организационная инфраструктура, обеспечивающая интеграцию процессов управления знаниями с организационной культурой, организационными изменениями и технологиями.	Организационная культура, ИТ-инфраструктура, процессы управления изменениями, оценка и контроль.	СУЗ как часть организационного устройства Акцент на необходимости системной интеграции «мягких» (культура) и «жестких» (ИТ) элементов.	[16, 19, 20, 22, 24, 25]
Процессная модель	Комплекс взаимосвязанных процессов, обеспечивающий непрерывный цикл создания, хранения, распространения и применения знаний для преобразования индивидуального и коллективного опыта в формализованные активы с целью повышения операционной эффективности и достижения стратегических целей организации.	Создание знаний, хранение знаний, распространение знаний, использование знаний.	Фокус на сквозных процессах как на универсальной и воспроизводимой основе СУЗ. Аспект адаптируемости под отраслевые контексты.	[4, 9, 11–13, 15, 23, 27, 28]
Социокультурная модель	Организационная система, в которой эффективность создания, обмена и применения знаний определяется в первую очередь человеческим фактором, включая лидерство, организационную культуру доверия и сотрудничества, а также системы мотивации и управления талантами.	Организационная культура доверия, лидерство, система мотивации, практики управления человеческими ресурсами.	Утверждение, что технологии и процессы вторичны по отношению к социальным и поведенческим аспектам. Успех СУЗ определяется средой, способствующей доверию и сотрудничеству.	[6, 14, 17]
Компетентностная модель	Подсистема управления человеческими ресурсами, обеспечивающая идентификацию, развитие и интеграцию индивидуальных и коллективных компетенций в ключевые бизнес-процессы для создания конкурентных преимуществ.	Компетенции сотрудников, коллективная работа, синергия, интеграция в бизнес-процессы.	Фокус на носителях знаний – людях и командах. Рассмотрение знаний как неотъемлемой части компетенций, которые необходимо развивать и применять непосредственно в рабочих процессах.	[18]
Технологическая модель	Информационно-технологическая система, обеспечивающая автоматизацию, масштабирование и формализацию процессов создания, хранения, поиска, распространения и использования знаний в организации за счет применения специализированных программно-аппаратных платформ.	Базы знаний, репозитории документов, программные платформы для совместной работы, аналитические инструменты.	Рассмотрение ИТ как основного драйвера и ядра СУЗ. Технологическая инфраструктура признается необходимым условием для формализации и масштабирования работы со знаниями.	[3]
Модель управления интеллектуальными активами	Корпоративная система управления активами, которая идентифицирует, оценивает и управляет знаниями организации как формальными стратегическими активами, обеспечивая их сохранность, правовую охрану и целевое использование для поддержания конкурентного преимущества.	Идентификация знаний, оценка знаний, защита знаний, управление правами на интеллектуальную собственность.	Акцент на правовых и экономических аспектах знаний. Рассмотрение знаний как интеллектуальной собственности, требующей активного управления и охраны.	[2]

ми предложено следующее определение: «Система управления знаниями – это управляющая система, обеспечивающая целенаправленное преобразование интеллектуальных ресурсов организации в формализованные активы через непрерывный цикл процессов создания, распространения и использования знаний для достижения стратегических целей предприятия в условиях внешних и внутренних возмущений».

Основные задачи использования СУЗ в организациях можно разделить на четыре категории (*табл. 2*).

1.3. Обоснование состава переменных состояния СУЗ

Проведенный в предыдущих разделах анализ литературы позволил выделить ряд сквозных тематических направлений, которые наиболее часто рассматриваются исследователями в контексте эффективности управления знаниями. К числу таких направлений относятся: ценность актуального и своевременно обновляемого информационного наполнения [1, 13]; проблема перевода неявного опыта в формализованные активы [10, 15]; роль коммуника-

Таблица 2.

Основные задачи использования СУЗ в организациях

Категории	Задачи	Содержание
Сохранение и систематизация знаний	Сбор и фиксация знаний	Выявление и формализация как явных (документы, инструкции), так и неявных (опыт, экспертиза, ноу-хау) знаний сотрудников.
	Структурирование и организация	Создание единой, логичной и удобной структуры для хранения и поиска информации (например, с помощью таксономий, категорий, меток).
	Сохранение критических знаний	Предотвращение «утечки мозгов», то есть утраты уникального профессионального опыта при увольнении ключевых сотрудников, уходе на пенсию или смене проектов.
Доступ и распространение знаний	Обеспечение быстрого и точного поиска	Предоставление сотрудникам инструментов для поиска нужной информации в нужный момент, минимизация времени на информационный поиск.
	Распространение лучших практик	Выявление успешных методик, решений и подходов и их активное распространение по всем релевантным подразделениям компании.
	Снижение барьеров для обмена	Создание сред (например, порталов, форумов), где сотрудники могут легко задавать вопросы, делиться опытом и находить экспертов.
Эффективность и развитие	Повышение операционной эффективности	Сокращение затрат за счет избегания повторения ошибок и дублирования работы.
	Ускорение адаптации новых сотрудников	Предоставление новичкам централизованного доступа к всей необходимой информации о процессах, продуктах и стандартах компании, что сокращает время их вхождения в должность.
	Стимулирование инноваций и обучение	Создание среды, где существующие знания комбинируются и используются для генерации новых идей, продуктов и решений.
Качество и принятие решений	Повышение качества решений	Обеспечение сотрудников и руководителей полной, актуальной и проверенной информацией для принятия обоснованных решений.
	Стандартизация процессов и решений	Создание единой базы эталонных решений, методологий и инструкций, что повышает предсказуемость и качество результатов работы.
	Улучшение обслуживания клиентов	Обеспечение службы поддержки и менеджеров быстрым доступом к полной истории взаимодействий с клиентом, типовым решениям и базам знаний по продуктам.

ционной активности и горизонтальных связей в распространении знаний [2, 9, 17]; способность организации усваивать внешние знания и адаптировать лучшие практики [4, 7, 24]; интеграция знаний в ключевые бизнес-процессы [3, 10]; а также влияние организационной культуры, доверия и мотивации на готовность сотрудников делиться знаниями [12, 17, 25].

Обобщение указанных направлений позволяет выделить шесть укрупненных латентных факторов, которые в совокупности описывают состояние системы управления знаниями организации:

1. Актуальность знаний – обобщает проблематику своевременного обновления информационных массивов и их соответствия текущим задачам [1, 13].
2. Формализация знаний – отражает степень перевода неявного опыта в структурированные и доступные активы [10, 15].
3. Интенсивность обмена знаниями – характеризует активность коммуникационных процессов и горизонтальных связей [2, 9, 17].
4. Поглощающая способность – аккумулирует вопросы, связанные с усвоением внешних знаний и адаптацией лучших практик [4, 7, 24].
5. Интеграция знаний в процессы – описывает встроенность практик управления знаниями в повседневную деятельность [3, 10].
6. Культура обмена знаниями – обобщает влияние социальных норм, доверия и мотивации на готовность делиться опытом [12, 17, 25].

Выделенные переменные легли в основу дальнейшей разработки модели наблюдаемости и были предложены экспертам для уточнения и верификации в ходе интервью.

1.4. Гипотеза исследования

На основе проведенного анализа литературы и выделенного состава латентных переменных состояния СУЗ сформулирована гипотеза исследования. Основное предположение заключается в том, что внутренние (скрытые) состояния СУЗ могут быть количественно восстановлены по ограниченному набору косвенных измерений на основе математического аппарата структурной наблюдаемости.

Из данного общего предположения вытекают две частные гипотезы:

Гипотеза H1 – о наблюдаемости СУЗ: существует минимально достаточный набор индикаторов, обеспечивающий наблюдаемость шести выделенных латентных переменных; заданная экспертами структура связей обладает полнотой, необходимой для идентификации системы.

Гипотеза H2 – о диагностической значимости: восстановленные значения латентных переменных позволяют не только диагностировать текущее состояние СУЗ, но и выявлять «слепые зоны» – аспекты, слабо наблюдаемые при данной системе измерений и требующие уточнения процедур или введения новых индикаторов.

2. Материалы и методы

2.1. Математическая модель и методика оценки структурной наблюдаемости СУЗ

В теории управления наблюдаемость классически определяется как свойство динамической системы, позволяющее восстановить вектор состояния $X(t)$ по измерениям выхода $Y(\tau)$ на предшествующем интервале времени. В более узком смысле говорят о *параметрической идентифицируемости* – возможности определения параметров системы. В обоих случаях предполагается наличие динамики.

В данной работе задача диагностики СУЗ решается в *статической постановке* (периодический «срез» состояния). Поэтому термин «структурная наблюдаемость» используется в адаптированном смысле: его операциональным эквивалентом в статике выступает *структурная идентифицируемость* модели измерений $Z = CX$ – возможность однозначно восстановить вектор состояния X по экспертно заданной матрице C и вектору измерений Z методом взвешенных наименьших квадратов.

Выбор адаптированного подхода обусловлен тремя факторами: качественной природой исходных данных, наличием скрытых (латентных) переменных состояния СУЗ и практической ограниченностью измерительной базы. Статический характер модели адекватен задаче оценки текущего состояния СУЗ: в рамках периодического аудита достаточно точечной диагностики в фиксированный момент времени. Операциональным эквивалентом наблюдаемости выступает идентифицируемость модели измерений, проверяемая через анализ обусловленности матрицы C и устойчивости оце-

нок. Термины «наблюдаемость» и «идентифицируемость» используются как взаимодополняющие: первый – на концептуальном уровне, второй – на операциональном, задавая критерий разрешимости задачи восстановления состояния.

Под пространством состояний системы X понимается множество возможных значений вектора ее латентных переменных. В рамках статической модели эти факторы рассматриваются как неизменные в течение периода оценки. В данной работе рассматривается случай избыточных измерений:

$$\dim(Z) > \dim(X). \quad (1)$$

Такая постановка адекватна задаче исследования состояния СУЗ, потому что она позволяет учесть множественность косвенных проявлений каждого латентного фактора, повысить устойчивость и точность оценки за счет избыточности данных, компенсируя высокий уровень шума, неполноты и субъективности отдельных измерений, характерный для организационных и социальных систем.

Авторская методика оценки структурной наблюдаемости СУЗ состоит из следующих этапов:

1. Определение на основе анализа литературы и экспертных знаний качественного состава n латентных переменных состояния СУЗ, которым в рамках математического моделирования будет ставится в соответствие вектор восстанавливаемых числовых оценок переменных состояния СУЗ:

$$X = \{x_1, ..., x_n\}^T. \quad (2)$$

2. Построение ориентированного графа причинно-следственных связей между переменными состояния СУЗ:

$$G = (X, R), x_i \to x_k \in R, \quad (3)$$

где $R \subseteq X \times X$ – множество ориентированных дуг;

$x_i \to x_k \in R$ – наличие причинно-следственной связи от состояния x_i к состоянию x_k.

3. Определение на основе анализа литературы и экспертных знаний качественного состава m измерений (индикаторов) состояния СУЗ.

4. Определение на основе экспертных знаний m количественных значений вектора измерений (индикаторов) состояния СУЗ:

$$Z = \{z_1, ..., z_m\}^T, \quad (4)$$

где $m > n$.

В данной математической модели вектор измерений связан с вектором состояния линейным уравнением:

$$Z = CX, \quad (5)$$

где C – матрица репрезентативности измерений ($m \times n$).

5. Определение на основе экспертных знаний количественных значений компонент матрицы репрезентативности измерений C, где элемент c_{ji} характеризует вклад измерения z_j в определение переменной состояния x_i.

6. Восстановление вектора состояния X по измерениям Z и матрице репрезентативности C. При решении этой задачи для учета различной точности экспертных оценок использовался метод взвешенных наименьших квадратов, минимизирующий функционал:

$$J(X) = (Z - CX)^T W (Z - CX), \quad (6)$$

где W– весовая матрица:

$$W = \text{diag}\left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \ldots, \frac{1}{\sigma_m^2}\right), \quad (7)$$

где σ_j – стандартная ошибка средней экспертной оценки j-го измерения (мера разброса экспертных суждений);

m – количество измерений.

Минимизация функционала приводит к оценке вектора состояния СУЗ:

$$\hat{X} = \left(C^T W C\right)^{-1} C^T W Z. \quad (8)$$

Для обеспечения устойчивости вычислений при возможной вырожденности матрицы C решение находилось через сингулярное разложение (SVD) с использованием функции *numpy.linalg.svd*. При обнаружении малых сингулярных чисел применялась регуляризация Тихонова с параметром $\lambda = 10^{-6}$. Алгоритм возвращал не только точечные оценки переменных состояния, но и меру их неопределенности, что позволило строить доверительные интервалы и оценивать статистическую значимость полученных результатов.

Все вычисления выполнялись в среде Python 3.9 с использованием библиотек NumPy 1.21.0 (сингулярное разложение, операции с матрицами) и SciPy 1.7.0 (проверка обусловленности). Полученные оценки вектора X интерпретировались с учетом доверительных интервалов с уровнем доверия 95%. Значения переменных анализировались в контексте их содержательного смысла в модели СУЗ, где возможные отрицательные значения указывали на отклонение от базового уровня состояния СУЗ в отрицательную сторону.

Следует отметить, что граф G не участвует в численном восстановлении X по формуле (8) – оно выполняется с использованием матрицы C и вектора Z. Граф выполняет две функции. Первая – качественная проверка структурной наблюдаемости на топологическом уровне: система структурно наблюдаема, если от каждой переменной состояния существует ориентированный путь к измерению. В данной работе этот критерий использовался при верификации экспертной модели: проверялась достижимость всех переменных из множества измерений в объединенном графе (G, C). Вторая – содержательная интерпретация результатов: граф позволяет объяснить механизмы влияния переменных и установить, является ли ненаблюдаемость переменной следствием слабого влияния со стороны «донорских» переменных или недостаточной полноты измерительной системы. Таким образом, C обеспечивает количественное оценивание, G – структурный анализ и интерпретацию; их совместное использование дает комплексную диагностику СУЗ.

2.2. Процедура экспертной оценки параметров модели наблюдаемости СУЗ

Для построения модели СУЗ была организована и проведена комплексная экспертиза, в которой приняли участие 12 экспертов, представляющих АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», непосредственно вовлеченных в процессы управления знаниями, управления инновационным развитием, а также планирования и сопровождения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР):

1. Руководители среднего звена корпоративного центра АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», отвечающие за формирование политики в области управления знаниями и инновационного развития.
2. Руководители профильных подразделений в дочерних обществах АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «ОДК-Климов», ПАО «ОДК-УМПО», АО «ОДК-СТАР»), реализующие стратегические инициативы на местах и координирующие операционную деятельность.
3. Специалисты и эксперты корпоративного центра АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» и профильных подразделений дочерних обществ АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», непосредственно участвующие в сопровождении НИОКР, генерации знаний, а также в процессах сбора, систематизации и трансфера знаний.

Все эксперты на момент проведения экспертизы имели стаж работы на предприятии более трех лет и подтвержденный практический опыт участия в проектах по внедрению или развитию элементов системы управления знаниями.

Такой состав экспертной группы обеспечивает многомерность взгляда на исследуемую систему управления знаниями и позволяет учесть как стратегическое видение руководства, так и операционный опыт линейных сотрудников. Гетерогенность экспертной группы рассматривается в данном исследовании не как ограничение, а как источник более полного и разностороннего описания объекта.

Осознавая потенциальные риски, связанные с разнородностью экспертной группы (различный уровень информированности, неодинаковая уверенность в оценках), авторы применили процедуру калибровки стандартных отклонений на основе анализа согласованности экспертных суждений. Данный подход позволяет элиминировать субъективный компонент самооценки уверенности и опереться на объективно наблюдаемую меру согласия между экспертами.

Экспертиза проводилась в два этапа.

Первый этап был посвящен определению качественного состава латентных переменных состояния и измерений (индикаторов) СУЗ.

Состав шести переменных состояния (обоснованный в п. 1.3) и предварительный перечень десяти измерений, сформированный на основе анализа литературы, были вынесены на экспертизу для уточнения формулировок и проверки полноты охвата аспектов СУЗ. Состав и формулировки пе-

ременных состояния были утверждены в ходе экспертных интервью с ключевыми специалистами АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» в сфере управления знаниями без существенных изменений.

Помимо этого, на основе анализа литературы авторами был сформирован предварительный перечень показателей, рассматриваемых в качестве измерений (индикаторов) состояния СУЗ:

- частота обновления репозиториев [10, 13];
- востребованность формальных знаний [10, 15];
- время доступа к знаниям [12];
- активность во внутренних сетях и форумах [2, 17];
- доля проектов с внешним бенчмаркингом [4, 14];
- использование знаний в принятии решений [3, 10];
- удовлетворенность инструментами СУЗ [7, 12].

В ходе экспертизы этот перечень был дополнен показателями, не нашедшими прямого отражения в проанализированной литературе, но признанными экспертами значимыми для диагностики СУЗ в условиях конкретного предприятия:

- количество кросс-функциональных мероприятий;
- скорость адаптации внешних практик;
- готовность делиться знаниями.

Таким образом, по результатам первого этапа экспертизы был сформирован итоговый состав десяти измерений, используемый в дальнейшем для параметризации модели наблюдаемости СУЗ.

Второй этап был направлен на получение количественных оценок: матрицы причинно-следственных связей переменных состояния СУЗ, вектора измерений состояния СУЗ и матрицы репрезентативности измерений по отношению к переменными состояния СУЗ:

1. Для выявление причинно-следственных связей между шестью переменными состояния СУЗ использовался метод формализованного парного сравнения. Каждому эксперту предлагалось сформировать индивидуальную матрицу причинно-следственных связей размером 6 × 6, где строки и столбцы соответствуют переменным состояния СУЗ. Матрица причинно-следственных связей включала оценки взаимовлияния 30 пар переменных (без учета диагональных значений x_{ii}). Каждый эксперт дал индивидуальную бинарную оценку влияния одной переменной состояния на другую ($x_i \rightarrow x_j$): где 0 – отсутствие влияния, 1 – наличие влияние. Инструкция выглядела следующим образом: «Поставьте в ячейки матрицы цифру 1, если считаете, что показатель (в строке) может влиять на показатель (в столбце)». При оценке влияния экспертам предлагалось не учитывать характер (знак) влияния (положительное или отрицательное). В результате статистической обработки индивидуальных матриц были получены две матрицы: средних значений и стандартных отклонений экспертных оценок взаимовлияния. Матрица стандартных отклонений позволила оценить степень консенсуса в суждениях экспертов. После построения матриц была проведена модерируемая дискуссия, в ходе которой эксперты аргументировали свое мнение, что позволило устранить терминологические разночтения и прийти к согласованному пониманию состава и характера существенных связей переменных состояния СУЗ. В результате был построен ориентированный граф причинно-следственных связей $G = (X, R)$, который лег в основу структурной модели системы.
2. Для количественной оценки десяти компонент вектора измерений Z экспертам было предложено, используя бинарную шкалу 0 или 1, определить факт использования данного индикатора на предприятии. Инструкция выглядела следующим образом: «Если данный индикатор используется на вашем предприятии, поставьте цифру 1 в соответствующую ячейку столбца Z». На основе индивидуальных экспертных оценок были получены два вектора: средних значений и стандартных отклонений экспертных оценок качества измерений (как мера неопределенности экспертных оценок).
3. Для формирования матрицы репрезентативности C (10 × 6) каждому эксперту было предложено сформировать матрицу индивидуальных оценок, используя бинарную шкалу 0 или 1. Значение 1 присваивалось в случае, если соответствующий индикатор позволяет (хотя бы частично) оценить заданную переменную состояния СУЗ; значение 0 указывало на отсутствие такой репрезентативности. Инструкция выглядела следующим образом: «Поставьте цифру 1 в ячейки матрицы, если считаете, что этот индикатор (см. строку) позволяет оценить данный показатель (см. столбец)». После формирова-

ния индивидуальных матриц была проведена их статистическая обработка, результатом которой стали две матрицы: матрица средних значений экспертных оценок и матрица стандартных отклонений оценок, характеризующая степень консенсуса мнений экспертов.

2.3. Предварительная обработка экспертных данных

Обработка результатов экспертизы осуществлялась в два этапа.

Первый этап. Осуществлялась первичная статистическая обработка количественных экспертных данных, состоявшая в получении:

а) матрицы средних значений экспертных оценок причинно-следственных связей переменных состояния;

б) матрицы средних значений экспертных оценок репрезентативности измерений;

в) векторов средних значений и стандартных отклонений экспертных оценок измерений.

Второй этап. Для обеспечения корректности оценивания переменных состояния СУЗ на основе модели измерений (5) была выполнена обработка экспертных данных, направленная на устранение потенциальных источников инструментальных погрешностей.

1. **Редукция размерности матрицы репрезентативности путем объединения сильно коррелированных переменных для устранения мультиколлинеарности.** Потенциально высокая корреляция между столбцами матрицы репрезентативности (мультиколлинеарность) может стать причиной нестабильности оценок состояния, получаемых методом наименьших квадратов, и затруднить их содержательную интерпретацию. Для выявления мультиколлинеарности был проведен анализ корреляционной матрицы коэффициентов парной корреляции Пирсона между всеми шестью исходными параметрами. В случае обнаружения коэффициентов корреляции, превышающих пороговое значение 0,7, выполнялась редукция размерности путем объединения сильно коррелированных переменных в один интегральный параметр. Объединение осуществлялось методом поэлементного усреднения соответствующих столбцов матрицы C, что позволило сохранить общий уровень влияния объединенного фактора на наблюдаемые показатели, не внося дополнительных искажений.

   Матрица экспертных оценок взаимовлияния переменных состояния была приведена к редуцированной размерности путем усреднения строк и столбцов, соответствующих объединяемым переменным.

2. **Калибровка значений вектора стандартных отклонений экспертных оценок измерений.** Для повышения объективности весовой матрицы W, используемой в методе взвешенных наименьших квадратов (6), была выполнена калибровка исходного вектора стандартных отклонений. Непосредственное использование исходных стандартных отклонений, рассчитанных на основе бинарных экспертных оценок, могло привести к неверному распределению весов между измерениями и, как следствие, к искажению итоговых оценок параметров состояния.

Исходными данными для корректировки послужила дополнительно построенная матрица E экспертных оценок вектора измерений размерности 10×12, строки которой соответствуют десяти измерениям, а столбцы – двенадцати экспертам (см. приложение). Для каждого измерения были рассчитаны: среднее значение (по числу экспертов) оценок (μ_i) и стандартное отклонение – несмещенная оценка ($\sigma_i^{\text{эксп}}$), характеризующая разброс экспертных мнений относительно использования данного индикатора на предприятии.

Коэффициент вариации $CV_i = \sigma_i^{\text{эксп}}/\mu_i$ использовался как мера относительной несогласованности экспертных оценок. Чем выше CV_i, тем менее согласованы мнения экспертов и тем выше неопределенность, связанная с данным измерением. Для калибровки исходных значений стандартных отклонений применялся коэффициент коррекции:

$$k_i = 1 + CV_i.$$

Калибровка выполнялась по формуле:

$$\sigma_i^{\text{калибр}} = \sigma_i^{\text{исх}} \cdot k_i.$$

Содержательный смысл данной процедуры заключается в следующем. Для измерений с высокой согласованностью экспертных оценок ($CV_i \approx 0$) коэффициент коррекции близок к единице, и исходные значения стандартного отклонения практически не изменяются. При низкой согласованности ($CV_i > 0$) коэффициент коррек-

ции превышает единицу, что приводит к увеличению стандартного отклонения и, соответственно, к снижению веса соответствующего измерения в матрице W (поскольку $w_i = 1/(\sigma_i^{\text{калибр}})^2$). В результате ненадежные измерения с низкой согласованностью экспертных оценок получают меньший вес при восстановлении вектора состояния, что соответствует содержательной логике процедуры.

Таким образом, калибровка значений вектора стандартных отклонений экспертных оценок измерений позволила привести весовую матрицу W в соответствие с реальной степенью неопределенности, объективно выявленной на основе анализа согласованности экспертных ответов.

При интерпретации результатов необходимо учитывать статистические ограничения, связанные с природой исходных данных. Экспертные оценки бинарны (0 или 1); их среднее по группе интерпретируется как доля экспертов, подтвердивших признак, и не является измерением в классическом смысле. Число экспертов (12) не позволяет строить надежные асимптотические выводы, поэтому доверительные интервалы и p-значения рассматриваются как индикативные меры неопределенности. При расчете стандартных ошибок оценок $\hat{X}$ учитывается только неопределенность вектора Z (через матрицу W), но не учитывается неопределенность матрицы C, что означает, что фактические доверительные интервалы могут быть шире. В связи с этим переменная считается наблюдаемой, если ее доверительный интервал не включает ноль; в противном случае она ненаблюдаема.

Такой подход соответствует практике исследований с небольшими выборками, где акцент делается на интерпретации паттернов и выявлении структурных ограничений измерительной системы.

3. Результаты

3.1. Результаты качественного этапа экспертизы

Качественный состав латентных переменных состояния СУЗ, утвержденный в ходе экспертных интервью, приведен в *таблице 3*.

Качественный состав измерений (индикаторов) состояния СУЗ, утвержденный в ходе экспертных интервью, приведен в *таблице 4*.

Эти формулировки использовались в ходе процедуры экспертной оценки параметров модели наблюдаемости СУЗ.

3.2. Результаты предварительной обработки количественных экспертных данных

Первый результат. Редукция размерности матрицы репрезентативности. Для выявления потенциальной мультиколлинеарности матрицы средних значений экспертных оценок репрезентативности

Таблица 3.

Качественный состав латентных переменных состояния СУЗ

Код	Переменная	Содержание
x_1	Актуальность знаний	Соответствие накопленных в организации знаний текущим внешним и внутренним условиям.
x_2	Формализация знаний	Доля и качество знаний, закрепленных в явном, структурированном и общедоступном виде.
x_3	Интенсивность обмена	Частота, объем и легкость передачи знаний между людьми и подразделениями.
x_4	Поглощающая способность	Способность организации идентифицировать, усваивать и применять внешние знания.
x_5	Интеграция в процессы	Степень, с которой знания встроены в рутинные бизнес-процессы и принятие решений.
x_6	Культура обмена	Уровень доверия, сотрудничества и мотивации, способствующий обмену знаниями.

Таблица 4.

Качественный состав измерений (индикаторов) состояния СУЗ

Код	Индикатор	Содержание	Единица измерения
z_1	Частота обновления репозиториев	Количество изменений в базах знаний, документации, инструкциях за период.	Единиц в месяц
z_2	Востребованность формальных знаний	Число обращений к базам знаний, частота использования регламентов.	Количество просмотров или скачиваний
z_3	Время доступа к знаниям	Среднее время поиска и получения нужной информации для решения стандартной задачи.	Часы или минуты (хронометраж или опрос)
z_4	Активность во внутренних сетях и форумах	Количество сообщений, вопросов, ответов, обмен файлами на корпоративных площадках.	Единиц в месяц
z_5	Количество кросс-функциональных мероприятий	Число рабочих встреч, семинаров, проектов с участием разных отделов.	Единиц в квартал (отчеты)
z_6	Доля проектов с внешним бенчмаркингом	Процент инициатив, в основе которых лежит анализ внешнего опыта.	Процент (анализ портфеля проектов)
z_7	Скорость адаптации внешних практик	Время от выявления внешней практики до ее пилотного внедрения.	Месяцы
z_8	Использование знаний в принятии решений	Доля документов (отчетов, решений), содержащих ссылки на базы знаний или уроки прошлого.	Процент (экспертная оценка)
z_9	Готовность делиться знаниями	Субъективная оценка сотрудниками легкости и бесконфликтности обмена опытом.	Баллы (анкетирование)
z_{10}	Удовлетворенность инструментами СУЗ	Оценка сотрудниками удобства и полезности систем управления знаниями.	Баллы (анкетирование)

измерений (10 × 6) была рассчитана корреляционная матрица коэффициентов парной корреляции Пирсона между шестью исходными параметрами модели. Расчет выполнялся в среде Python 3.9 с использованием библиотеки NumPy 1.21 (функция *numpy.corrcoef*).

Исходная корреляционная матрица имела следующий вид:

$$R_{\text{исх}} = \begin{pmatrix} 1{,}000 & 0{,}483 & -0{,}292 & -0{,}142 & 0{,}115 & -0{,}323 \\ 0{,}483 & 1{,}000 & -0{,}467 & -0{,}496 & 0{,}170 & -0{,}355 \\ -0{,}292 & -0{,}467 & 1{,}000 & -0{,}345 & -0{,}194 & 0{,}911 \\ -0{,}142 & -0{,}496 & -0{,}345 & 1{,}000 & 0{,}018 & -0{,}362 \\ 0{,}115 & 0{,}170 & -0{,}194 & 0{,}018 & 1{,}000 & -0{,}346 \\ -0{,}323 & -0{,}355 & 0{,}911 & -0{,}362 & -0{,}346 & 1{,}000 \end{pmatrix}.$$

Анализ выявил наличие высокой положительной корреляции ($r = 0{,}911$) между переменными x_3 – «интенсивность обмена» и x_6 – «культура обмена», что свидетельствует о дублировании информации и потенциальной невозможности их раздельной идентификации в рамках модели измерений.

Для устранения мультиколлинеарности эти переменные были объединены в интегральный показатель «Интенсивность и культура обмена знаниями». Данное объединение предпринято по статистическим соображениям и не означает полной содержательной тождественности этих организационных феноменов. Интегральный параметр отражает комплексное влияние коммуникационных процессов в рамках принятой системы индикаторов.

Процедура объединения выполнялась путем поэлементного усреднения соответствующих столбцов исходной матрицы C, что позволило сохранить общий уровень влияния объединенного фактора на наблюдаемые показатели, не внося дополнительных искажений, связанных с выбором большего или меньшего значения.

В результате проведенного преобразования размерность модели сократилась с 6 до 5 параметров. Объединенный параметр получил содержательную интерпретацию как «Интенсивность и культура обмена знаниями», что отражает интегральный

характер влияния коммуникационных процессов на наблюдаемость СУЗ:

$$C = \begin{pmatrix} 1{,}000 & 0{,}750 & 0{,}583 & 0{,}417 & 0{,}583 \\ 0{,}417 & 0{,}583 & 0{,}583 & 0{,}417 & 0{,}667 \\ 0{,}333 & 0{,}333 & 0{,}564 & 0{,}583 & 0{,}833 \\ 0{,}333 & 0{,}250 & 1{,}000 & 0{,}583 & 0{,}417 \\ 0{,}333 & 0{,}167 & 1{,}000 & 0{,}667 & 0{,}545 \\ 0{,}500 & 0{,}583 & 0{,}458 & 0{,}750 & 0{,}333 \\ 0{,}333 & 0{,}333 & 0{,}458 & 0{,}917 & 0{,}667 \\ 0{,}500 & 1{,}000 & 0{,}542 & 0{,}500 & 0{,}833 \\ 0{,}250 & 0{,}667 & 0{,}917 & 0{,}167 & 0{,}417 \\ 0{,}583 & 0{,}500 & 0{,}833 & 0{,}500 & 0{,}833 \end{pmatrix}.$$

После выполнения редукции был проведен повторный анализ корреляционной матрицы для пяти параметров с использованием функции *numpy.corrcoef*:

$$R_{\text{ред}} = \begin{pmatrix} 1{,}000 & 0{,}483 & -0{,}316 & -0{,}142 & 0{,}115 \\ 0{,}483 & 1{,}000 & -0{,}418 & -0{,}496 & 0{,}170 \\ -0{,}316 & -0{,}418 & 1{,}000 & -0{,}363 & -0{,}287 \\ -0{,}142 & -0{,}496 & -0{,}363 & 1{,}000 & 0{,}018 \\ 0{,}115 & 0{,}170 & -0{,}287 & 0{,}018 & 1{,}000 \end{pmatrix}.$$

Полученная матрица не содержит значений коэффициентов корреляции, превышающих 0,7, что подтвердило устранение мультиколлинеарности и обеспечило корректную идентифицируемость параметров в дальнейшем анализе и повышает устойчивость оценивания при решении системы уравнений наблюдения.

Матрица взаимовлияния переменных состояния СУЗ, приведенная к редуцированной размерности 5 × 5 путем усреднения строк и столбцов, соответствующих объединяемым переменным, получила вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0{,}667 & 0{,}542 & 0{,}417 & 0{,}583 \\ 0{,}500 & 0 & 0{,}708 & 0{,}583 & 0{,}667 \\ 0{,}875 & 0{,}708 & 0 & 0{,}792 & 0{,}750 \\ 0{,}417 & 0{,}417 & 0{,}667 & 0 & 0{,}583 \\ 0{,}583 & 0{,}833 & 0{,}750 & 0{,}750 & 0 \end{pmatrix},$$

где диагональные элементы приняты равными нулю (переменная не влияет сама на себя).

Второй результат. На основе матрицы взаимовлияния переменных состояния был определен порог существенности связей. Значение порога установлено на уровне 0,75, что соответствует 85% от максимального значения в матрице (0,875). Выбор данного порога обусловлен необходимостью обеспечить наглядность графа при сохранении наиболее сильных влияний.

На *рисунке 1* показан ориентированный граф существенных причинно-следственных связей между переменными состояния СУЗ, построенный на основе матрицы взаимовлияния переменных. Направленная дуга (стрелка) показывает влияние одной переменной на другую. Под влиянием понимается способность переменной определять или модифицировать состояние другой переменной.

Граф существенных связей (*рис. 1*) служит основой для качественной проверки структурной наблюдаемости и интерпретации результатов количественного оценивания (п. 3.3). Анализ показал, что переменные «Интенсивность и культура обмена» (x_3) и «Интеграция знаний в процессы» (x_5) связаны двусторонним влиянием, образуя комплексный вход СУЗ («коллективный донор»), который определяет состояние трех переменных-реципиентов: «Актуальность знаний» (x_1), «Формализация знаний» (x_2) и «Поглощающая способность» (x_4). Топологическая проверка подтвердила наличие ориентированных путей от всех переменных к измерениям, что свидетельствует о структурной наблюдаемости системы.

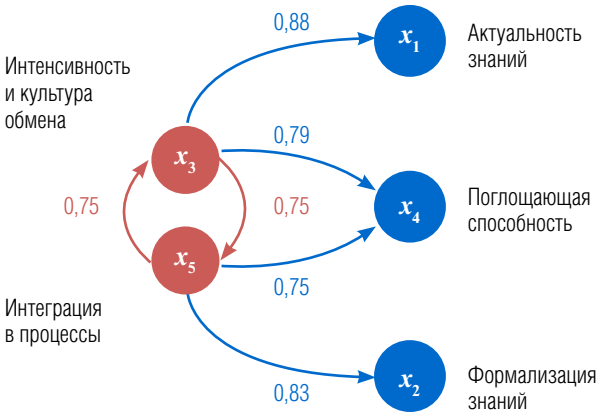


Рис. 1. Ориентированный граф существенных причинно-следственных связей между переменными состояния СУЗ. Цифрами показаны средние значения экспертных оценок, как степень достоверности связи.

Содержательно активный обмен знаниями, подкрепленный культурой доверия, создает условия для встраивания знаний в рабочие процессы; востребованность знаний в процессах, в свою очередь, стимулирует их обновление и укрепляет культуру обмена, формируя положительный контур взаимного усиления. Влияние комплексного входа на реципиентов раскрывается через три механизма: регулярное обращение к знаниям актуализирует их (обратная связь); активное использование и передача знаний требуют их фиксации в документах и базах (x_2); развитые внутренние коммуникации формируют готовность к усвоению внешних инноваций (x_4).

Таким образом, x_1, x_2 и x_4 выражают результаты функционирования СУЗ: их состояние зависит от входных факторов, но обратного влияния на донорские переменные они не оказывают. Это свидетельствует об однонаправленной связи в исследуемой СУЗ. Топологическая структура графа используется в п. 4.1 для объяснения почему входные факторы и формализация знаний оказались наблюдаемыми, а актуальность знаний и поглощающая способность – нет. Текущее состояние СУЗ можно охарактеризовать так: «СУЗ работает в режиме генератора, а не самообучающейся системы».

Третий результат. Калибровка значений вектора стандартных отклонений экспертных оценок измерений. Вектор средних значений экспертных оценок измерений имеет вид:

$$\mu = (0{,}750 \;\; 0{,}750 \;\; 0{,}667 \;\; 0{,}583 \;\; 0{,}917 \;\; 0{,}333 \;\; 0{,}333 \;\; 0{,}917 \;\; 0{,}667 \;\; 0{,}750)^T.$$

Для каждого измерения были рассчитаны: стандартное отклонение экспертных оценок $\sigma_i^{\text{эксп}}$ (мера разброса мнений), коэффициент вариации $CV_i = \sigma_i^{\text{эксп}}/\mu_i$ и калиброванное стандартное отклонение $\sigma_i^{\text{калибр}} = \sigma_i^{\text{исх}} \cdot (1 + CV_i)$, где $\sigma_i^{\text{исх}}$ – исходные значения стандартных отклонений, полученные на этапе первичной статистической обработки.

Исходные стандартные отклонения, полученные на этапе первичной статистической обработки, составили:

$$\sigma^{\text{исх}} = (0{,}104 \;\; 0{,}047 \;\; 0{,}082 \;\; 0{,}122 \;\; 0{,}093 \;\; 0{,}204 \;\; 0{,}204 \;\; 0{,}039 \;\; 0{,}133 \;\; 0{,}038)^T.$$

Коэффициенты вариации для измерений составили:

$$CV = (0{,}603 \;\; 0{,}603 \;\; 0{,}738 \;\; 0{,}883 \;\; 0{,}315 \;\; 1{,}477 \;\; 1{,}477 \;\; 0{,}315 \;\; 0{,}738 \;\; 0{,}603).$$

В итоговом виде вектор калиброванных стандартных отклонений экспертных оценок измерений составил:

$$\sigma^{\text{калибр}} = (0{,}167 \;\; 0{,}075 \;\; 0{,}143 \;\; 0{,}230 \;\; 0{,}122 \;\; 0{,}505 \;\; 0{,}505 \;\; 0{,}051 \;\; 0{,}231 \;\; 0{,}061)^T.$$

После выполнения указанных процедур подготовленные данные были использованы для восстановления вектора состояния X, то есть получения оценки $\hat{X}$ по методу взвешенных наименьших квадратов (7, 8).

3.3. Результаты восстановления вектора состояния СУЗ

На основе подготовленных данных было проведено решение системы уравнений наблюдения методом взвешенных наименьших квадратов (6–8). Оценки переменных вектора $\hat{X}$, их стандартные отклонения, доверительные интервалы и показатели статистической значимости представлены в *таблице 5*.

Значения *t*-статистик и *p*-значений в *таблице 5* носят индикативный характер, поскольку основаны на бинарных экспертных данных и малом числе экспертов (см. п. 2.4). Они позволяют ранжировать переменные по устойчивости оценивания, но не являются строгими статистическими критериями. Качество модели подтверждается суммой квадратов невязок (RSS = 0,107) и среднеквадратичной ошибкой (RMSE = 0,103); применение калибровки незначительно изменило точечные оценки (2–5%) и сократило доверительные интервалы для надежных измерений, что свидетельствует о повышении точности оценивания.

4. Обсуждение и выводы

4.1. Обсуждение результатов анализа структурной наблюдаемости СУЗ

Рассчитанные значения вектора оценок представляют собой оценки латентных состояний СУЗ, восстановленные на основе вектора измерений Z и матрицы репрезентативности измерений C в соответствии с разработанной математической моделью. Каждое значение переменной состояния интерпретируется как степень ее выраженности в исследуемой СУЗ.

Таблица 5.

Результаты восстановления вектора состояния СУЗ (с использованием калиброванной весовой матрицы)

Переменная	Содержание	Оценка	±2σ	t-статистика	p-значение	Доверительный интервал (95%)	Статус
x_1	Актуальность знаний	–0,087	±0,295	0,59	0,582	[–0,38; 0,21]	Незначимая
x_2	Формализация знаний	0,391	±0,187	4,18	0,009	[0,20; 0,58]	Значимая
x_3	Интенсивность и культура обмена	0,544	±0,241	4,51	0,006	[0,30; 0,79]	Значимая
x_4	Поглощающая способность	0,019	±0,386	0,10	0,924	[–0,37; 0,41]	Незначимая
x_5	Интеграция знаний в процессы	0,388	±0,327	2,37	0,064	[–0,01; 0,72]	Условно значимая

Примечание: переменная x_3 – объединенная в результате редукции матрицы репрезентативности; переменная x_5 имеет статус условно наблюдаемой ($p < 0{,}10$).

В контексте уточнения новизны исследования важно подчеркнуть, что предлагаемый подход выступает не как альтернатива методам многомерного статистического анализа (факторный анализ, SEM/PLS) или аудита знаний, а как дополнительный инструмент, фокусирующийся на структурных свойствах самой системы измерений. В отличие от факторного анализа, выявляющего статистические паттерны в данных, и SEM, требующего больших выборок для тестирования сложных гипотез, предложенная модель позволяет на основе экспертных суждений и небольшого числа индикаторов провести экспресс-диагностику наблюдаемости ключевых аспектов СУЗ. В отличие от многокритериальных экспертных методов, эффективных для агрегирования оценок, но не дающих формализованного представления о наблюдаемости системы, предлагаемая модель позволяет проверить принципиальную возможность восстановления латентных состояний по имеющейся системе индикаторов.

Прежде чем перейти к содержательной интерпретации полученных оценок, необходимо рассмотреть вопрос о природе выявленных ограничений наблюдаемости. Такие ограничения могут быть обусловлены двумя принципиально различными причинами. Первая связана с инструментальными погрешностями самой модели и метода оценивания – некорректной спецификацией связей в матрице измерений, неучтенными шумами измерений, мультиколлинеарностью или недостаточной полнотой набора индикаторов. Вторая причина отражает реальное положение дел в системе управления знаниями предприятия – отдельные аспекты СУЗ могут быть объективно слабо выражены, не структурированы или не интегрированы в управленческие практики, что и проявляется как их ненаблюдаемость.

В ходе исследования были предприняты систематические меры для минимизации инструментальных искажений. Отбор экспертов проводился с учетом их профессионального опыта и непосредственной вовлеченности в процессы управления знаниями. Предварительная обработка данных включала анализ мультиколлинеарности и редукцию размерности путем объединения сильно коррелированных переменных, что позволило устранить нестабильность оценок, связанную с дублированием информации. Калибровка весовой матрицы на основе согласованности экспертных суждений обеспечила более адекватное распределение доверия между измерениями. Тем не менее, полностью исключить инструментальные погрешности не представляется возможным: статический характер модели, потенциальная неполнота набора измерений и остаточная субъективность экспертных оценок остаются неустраненными ограничениями.

С учетом статистических допущений (см. п. 2.4) на основе индикативных критериев надежности выделены две наблюдаемые переменные: «фор-

мализация знаний» (x_2 = 0,391) и «интенсивность и культура обмена» (x_3 = 0,544). Переменная «Интеграция знаний в процессы» (x_5 = 0,388) имеет близкий к пороговому уровень надежности и рассматривается как условно наблюдаемая. Факторы «Актуальность знаний» (x_1 = −0,087) и «Поглощающая способность» (x_4 = 0,019) ненаблюдаемы в рамках текущей системы измерений. Выводы основаны на индикативной оценке устойчивости восстановления переменных, что соответствует рекомендациям для исследований с экспертными данными и небольшими выборками.

Высокое положительное значение интенсивности и культуры обмена (x_3 = 0,544) означает, что на предприятии обмен опытом является обычной практикой, сотрудники готовы делиться знаниями без дополнительных стимулов, а новые идеи активно обсуждаются в коллективе. Умеренное положительное значение формализации знаний (x_2 = 0,391) свидетельствует о наличии документированных процедур и использовании баз знаний, хотя часть знаний все еще хранится «в головах». Что касается статистически незначимых переменных, их численные значения не подлежат содержательной интерпретации; можно лишь констатировать, что актуальность знаний и поглощающая способность остаются «слепыми зонами» в действующей системе измерений.

С учетом индикативного характера критериев гипотеза H1 (о существовании набора измерений для наблюдаемости) подтверждается частично: три из пяти переменных после редукции устойчиво восстанавливаются (x_2, x_3, условно x_5), две (x_1, x_4) остаются ненаблюдаемыми. Гипотеза H2 (о диагностической значимости) подтверждается: модель позволяет выявлять «слепые зоны» – актуальность знаний и поглощающую способность, что требует уточнения измерительных процедур или введения новых индикаторов. Выводы основаны на индикативной оценке, а не на строгом тестировании. Модель полезна для структурного анализа, но нуждается в валидации на расширенных выборках.

С учетом построенного ориентированного графа причинно-следственных связей (см. *рис. 1*) полученные результаты интерпретируются следующим образом. Наблюдаемость переменных: «формализация знаний» (x_2), «интенсивность и культуры обмена» (x_3) и условная наблюдаемость «интеграции знаний в процессы» (x_5) обеспечивают возможность отслеживать состояние «комплексного входа» СУЗ, образованного переменными x_3 и x_5. Это позволяет анализировать взаимное влияние и индивидуальное этих факторов, а также прослеживать их воздействие на формализацию знаний – единственный из трех выходов, оказавшийся статистически значимым. В то же время влияние комплексного входа на два других выхода – актуальность знаний (x_1) и поглощающую способность (x_4) – остается ненаблюдаемым. Хотя теоретическая модель предполагает передачу свойств от «доноров» к этим «реципиентам» (с коэффициентами 0,55 и 0,79 соответственно), фактически зафиксировать эту передачу с помощью имеющихся измерений не удается.

С практической точки зрения сложившийся профиль наблюдаемости означает, что управленческие воздействия, направленные на развитие коммуникационной среды, могут быть достаточно надежно отслежены по их влиянию на формализацию знаний и интеграцию знаний в процессы. Это позволяет менеджменту целенаправленно развивать культуру обмена знаниями и оценивать эффективность соответствующих мероприятий. Однако невозможность напрямую наблюдать влияние коммуникационных процессов на актуальность знаний и поглощающую способность создает зону неопределенности: предприятие не может достоверно оценить, насколько используемые знания соответствуют текущим задачам и насколько эффективно усваиваются внешние знания. Таким образом, текущая конфигурация системы измерений обеспечивает удовлетворительный контроль над операционными аспектами управления знаниями, но оставляет за рамками наблюдения стратегически важные параметры.

Выявленная однонаправленность связей от входов x_3 / x_5 к выходам x_1, x_2, x_4 при отсутствии обратных влияний свидетельствует о важном ограничении исследуемой СУЗ: достигнутые результаты (актуальность, формализация, способность к усвоению знаний) не становятся источником дальнейшего развития коммуникационной среды и интеграционных процессов. Это лишает систему потенциала саморазвития и делает ее усиление зависимым от внешних управленческих воздействий.

С учетом результатов анализа наблюдаемости переменных состояния, предложенную ранее метафору, характеризующую СУЗ исследуемого предприятия, можно уточнить: «Система работает в

режиме генератора, но отсутствие наблюдаемости двух из трех выходных переменных и обратных связей не позволяет ей функционировать в режиме самообучающейся системы».

Предложенная математическая модель наблюдаемости СУЗ, основанная на принципах структурной наблюдаемости, демонстрирует новый подход к диагностике сложной организационной системы. В отличие от традиционных методов, опирающихся на качественные описания, данная модель позволяет перейти к формализованной оценке скрытых состояний по ограниченному набору измерений, что согласуется с современным трендом на количественный анализ организационных процессов в условиях цифровой трансформации.

Проведенная апробация подтвердила практическую значимость выбранных переменных состояния и позволила не только диагностировать количественные показатели СУЗ, но и оценить качество измерительной системы, выявив критические точки для повышения управляемости организацией на основе знаний.

4.2. Ограничения и перспективы исследования

Основное ограничение исследования связано с использованием экспертных оценок для построения вектора измерений и матрицы их репрезентативности. Субъективный характер экспертных суждений потенциально может вносить искажения в структуру модели. Однако высокая квалификация привлеченных экспертов с подтвержденным успешным опытом внедрения и эксплуатации СУЗ, а также применение статистических методов предварительной обработки данных (анализ мультиколлинеарности, калибровка весовой матрицы на основе согласованности суждений) позволили минимизировать риск субъективных искажений и инструментальных погрешностей.

Другим ограничением является статический характер предложенной модели, фиксирующей состояние СУЗ на конкретный момент времени. Развитие представленного подхода требует его валидации на данных других предприятий, а также динамического расширения для анализа временных рядов, что позволит перейти от точечной диагностики к мониторингу траекторий развития системы.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция формальной модели наблюдаемости с методами машинного обучения. Накопление исторических данных по векторам состояния и измерениям создает основу для построения предиктивных моделей, способных:

- прогнозировать динамику ключевых переменных СУЗ на основе паттернов прошлых периодов;
- автоматически выявлять сложные зависимости между измерениями и состояниями системы, выходящие за рамки экспертного графа G;
- обнаруживать аномалии и латентные угрозы путем анализа отклонений прогнозируемых значений от фактических.

4.3. Практические рекомендации

Параметризованная модель может стать основой для модуля или дашборда мониторинга СУЗ, что позволит организациям перейти от разовых экспертных оценок к регулярному контролю состояния системы управления знаниями. Техническая реализация предполагает интеграцию с корпоративными источниками данных, автоматизированный расчет вектора состояния X и его ошибок, визуализацию на интерактивных панелях с цветовой индикацией, а также сценарное моделирование управленческих воздействий.

По итогам апробации предложены следующие шаги по развитию СУЗ на предприятии: дополнить систему измерений индикаторами поглощающей способности; перейти к квартальному мониторингу минимально необходимого набора критических показателей; развивать культуру доверия и открытости через внутренние коммуникации и кросс-функциональные проекты; стандартизировать сбор данных для снижения субъективности; автоматизировать расчет и визуализацию состояния СУЗ.

Предложенное решение встраивает диагностику СУЗ в контур бизнес-аналитики организации, соответствует логике data-driven управления и может быть внедрено как силами ИТ-подразделения, так и с использованием low-code платформ, что делает модель практически реализуемым инструментом повышения зрелости управления знаниями.

Заключение

Разработана и апробирована математическая модель структурной наблюдаемости СУЗ, где под наблюдаемостью понимается свойство статической модели измерений $Z = CX$, позволяющая на основе структуры связей, заданной экспертом, между латентными переменными и индикаторами (матрица C) и вектора измерений Z восстановить вектор состояния X методом взвешенных наименьших квадратов. Наблюдаемость трактуется как структурная идентифицируемость – адаптация классического понятия к статической задаче диагностики СУЗ. На основе синтеза подходов осуществлена систематизация переменных состояния и измерений; формальная модель позволила перейти от качественных описаний к количественной диагностике скрытых состояний.

Основной научный результат исследования состоит в адаптации методов структурного анализа, экспертной идентификации и линейного оценивания к задаче диагностики СУЗ и демонстрации возможности восстановления внутренних состояний СУЗ по ограниченному набору измерений с использованием экспертных данных.

Новизна работы состоит в синтезе структурного анализа, экспертной идентификации и линейного оценивания для диагностики СУЗ в условиях ограниченной информации. Модель позволяет восстанавливать латентные состояния и выявлять структурные ограничения системы измерений, включая «слепые зоны» (актуальность знаний и поглощающая способность).

Апробация на промышленном предприятии выявила диагностическую мощность модели и «узкие места» в наблюдаемости, прежде всего – низкую наблюдаемость поглощающей способности. Модель апробирована с участием экспертов, имеющих опыт внедрения СУЗ, что подтверждает ее практическую применимость для организаций на этапе цифровой трансформации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность руководителям и специалистам АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», принявшим участие в экспертизе в рамках данного исследования. Их глубокие знания, практический опыт и ценные суждения об организационных механизмах управления знаниями стали основой для построения и апробации модели, обеспечив достоверность и практическую значимость полученных результатов. Авторы также искренне благодарят анонимного рецензента, чьи замечания и рекомендации позволили существенно повысить качество работы и уточнить ее ключевые положения. ■

Литература

1. Cristache N., Croitoru G., Florea N. V. The influence of knowledge management on innovation and organizational performance // Journal of Innovation & Knowledge. 2025. Vol. 10(5). Art. 100793. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100793

2. Dedunu H., Weerasinghe S., Wickcramasinghe A. Reality is different from what we see: Knowledge management and firm innovation // Journal of Innovation & Knowledge. 2025. Vol. 10(3). Art. 100693. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100693

3. Eromosele P. O., Korsakova T. V. Knowledge management strategy as a factor of increasing effectiveness and competitiveness of an organization // Управление в экономических и социальных системах. 2024. № 1(19). С. 37–42. [Электронный ресурс]: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_67873816_45973031.pdf (дата обращения 26.07.2026).

4. A systematic literature review on knowledge management for project risk management in construction / C. V. Amaechi [et al.] // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 114. Art. 114261. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114261

5. Zelenkov Y. A. The effectiveness of Russian organizations: The role of know ledge management and change readiness // Российский журнал менеджмента. 2018. Т. 16. № 4. С. 513–536. https://doi.org/10.21638/spbu18.2018.403

6. Соколов Д. Н., Завьялова Е. К. Интеграция стратегических ресурсов организации в условиях новой экономики: концептуальная модель // Вестник СПбГУ. Менеджмент. 2018. Т. 17. № 1. С. 46–68. https://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2018.103

7. Колясников М. С., Кельчевская Н. Р. Стратегии менеджмента знаний в компаниях: тенденции и влияние Индустрии 4.0 // Управленец. 2020. Т. 11. № 4. С. 82–96. https://doi.org/10.29141/2218-5003-2020-11-4-7

8. Jiang Z., Shi J., Liu Z. Digital transformation, knowledge management, and ambidextrous innovation in the high-speed train industry in China: The role of TMT's digital knowledge // Journal of Business Research. 2025. Vol. 200. Art. 115634. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2025.115634

9. Zhang R. Moderating effect of knowledge entrepreneurship in the relationship between knowledge management process and entrepreneurial success // Journal of Innovation & Knowledge. 2025. Vol. 10(4). Art. 100752. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100752

10. Nakash M., Bolisani E. Making knowledge management transparent: a new perspective on KM processes integration in the organizational framework // Business Process Management Journal. 2025. Vol. 31(8). P. 49–66. https://doi.org/10.1108/BPMJ-07-2024-0566

11. Гаврилова Т. А., Кузнецова А. В., Алканова О. Н., Гринберг Э. Я. Визуализация компетенций сотрудников с помощью карт знаний // Российский журнал менеджмента. 2024. Т. 22. № 1. С. 86–112. https://doi.org/10.21638/spbu18.2024.104

12. Азяби Н. Г. Влияние потенциала и процессов управления знаниями на эффективность малых и средних предприятий // Бизнес-информатика. 2018. Т. 12. № 3. С. 39–52. https://doi.org/10.17323/1998-0663.2018.3.39.52

13. Благов Е. Ю., Щербан С. А. Управление организационным забыванием: на примере российских машиностроительных компаний // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2019. Т. 18. № 2. С. 261–287. https://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2019.205

14. Стариков Д. А. Модель оценки эффективности систем управления знаниями в высокотехнологичных компаниях // Вестник евразийской науки. 2025. Т. 17. № s2. [Электронный ресурс]: https://esj.today/PDF/100FAVN225.pdf (дата обращения 26.07.2026).

15. Паршинцев А. А., Богданова М. В. Разработка методического обеспечения эффективного развития интеллектуального капитала в системе управления знаниями высокотехнологичных проектно-ориентированных компаний // Управленческий учет. 2022. № 2. С. 146–152. [Электронный ресурс]: https://uprav-uchet.ru/index.php/journal/article/view/1663/1125 (дата обращения 26.07.2026).

16. Днепровская Н. В., Шевцова И. В. Система менеджмента знаний в стратегическом управлении университетом // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 2. С. 20–40. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.2.20.40

17. Калабина Е. Г., Беляк О. Ю. Факторы обмена знаниями в процессе управления кросс-функциональными командами // Российский журнал менеджмента. 2021. Т. 19. № 4. С. 515–547. https://doi.org/10.21638/spbu18.2021.407

18. Славин Б. Б. Технологии коллективного интеллекта в управлении бизнес-процессами организации // Бизнес-информатика. 2022. Т. 16. № 2. С. 36–48. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.2.36.48

19. Караев Р. А., Садыхова Н. Ю. Преимущества когнитивного менеджмента для управления предприятием в современных условиях // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 2. С. 36-47. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.2.36.47

20. Зеленков Ю. А. Управление знаниями организации и большие языковые модели // Российский журнал менеджмента. 2024. Т. 22. № 3. С. 573–601. https://doi.org/10.21638/spbu18.2024.309

21. Кучумов И. В. Алгебраические модели представления данных и знаний в современных системах управления базами данных // Computational Nanotechnology. 2024. Т. 11. № 1. С. 78–84. https://doi.org/10.33693/2313-223X-2024-11-1-78-84

22. Мирошниченко М. А. Влияние искусственного интеллекта на эффективность управления документами и знаниями в банковской сфере // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. Т. 3. № 53. С. 552–557. [Электронный ресурс]: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-iskusstvennogo-intellekta-na-effektivnost-upravleniya-dokumentami-i-znaniyami-v-bankovskoy-sfere (дата обращения: 16.03.2026).

23. Трофимова Н. Н. Влияние управления знаниями на повышение эффективности управления бизнес-операциями // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 6. № 3. С. 151–157. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.03.06.019

24. Латуха М. О., Селивановских Л. В., Мицкевич Е. А. Практики управления талантливыми сотрудниками и поглощающая способность российских компаний // Российский журнал менеджмента. 2019. Т. 17. № 1. С. 5–28. [Электронный ресурс]: https://cyberleninka.ru/article/n/praktiki-upravleniya-talantlivymi-sotrudnikami-i-pogloschayuschaya-sposobnost-rossiyskih-kompaniy (дата обращения: 26.07.2026).

25. Плешкова А. Ю. Практики управления знаниями в российских образовательных организациях // Российский журнал менеджмента. 2024. Т. 22. № 1. С. 113–130. https://doi.org/10.21638/spbu18.2024.105

26. Попов Е. В., Аксенова Т. В. Основные тренды теории управления знаниями // Университетское управление: практика и анализ. 2019. Т. 23. № 3. С. 14–29. https://doi.org/10.15826/umpa.2019.03.016

27. Антонец В. А. Сегментация рынка добычи, создания, распространения и практического использования знаний // Университетское управление: практика и анализ. 2018. Т. 22. № 5. С. 9–21. https://doi.org/10.15826/umpa.2018.05.045

28. Бабин Е. Н. Цифровизация университета: построение интегрированной информационной среды // Университетское управление: практика и анализ. 2018. Т. 22. № 6. С. 44–54. https://doi.org/10.15826/umpa.2018.06.057

Приложение

Матрица *E* экспертных оценок вектора измерений

Строки соответствуют измерениям $z_1 \ldots z_{10}$, столбцы – экспертам $Э_1 \ldots Э_{12}$.

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Об авторах

Павел Александрович Михненко

доктор экономических наук, доцент;

профессор кафедры «Бизнес информатика», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1;

Email: pmihnenko@bmstu.ru

ORCID: 0000-0002-1766-8029

Мария Васильевна Ермакова

ведущий специалист, отдел управления развитием персонала подразделений НИОКР департамента управления знаниями и развитием персонала подразделений НИОКР, АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Россия, 105118, г. Москва, проспект Буденного, д. 16;

аспирант, кафедра «Бизнес-информатика», Московский государственный университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1;

Email: ermakovamvv@mail.ru

ORCID: 0009-0000-4054-7201

Mathematical model and methodology for assessing the structural observability of a knowledge management system: A practical case study at United Engine Corporation (UEC)

Pavel Aleksandrovich Mikhnenko [a]
Email: pmihnenko@bmstu.ru

Maria Vasilevna Ermakova [a,b]
Email: ermakovamvv@mail.ru

[a] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[b] JSC "United Engine Corporation", Moscow, Russia

Abstract

In the context of digital transformation, knowledge management has become a critical factor in the sustainable development of organizations; however, the state of Knowledge Management Systems (KMS) often remains poorly formalized and largely unobservable. A research gap exists in the lack of formalized models capable of diagnosing KMS states based on indirect measurements. This study aims to adapt and validate a mathematical framework of structural observability for diagnosing latent states of a KMS using a limited set of indirect measurements derived from expert data. Observability is herein conceptualized as the structural identifiability of a static measurement model, enabling the unique reconstruction of the latent state vector based on expert-specified structural linkages. The methodology integrates principles of structural observability, expert-based verification of causal relationships among state variables, and the weighted least squares (WLS) estimation technique. To enhance estimation reliability, the procedure incorporates dimensionality reduction of the linkage matrix (via aggregation of highly correlated variables) and calibration of the weighting matrix based on the consistency analysis of expert judgments. The primary scientific contribution lies in the adaptation of structural analysis, expert identification, and linear estimation methods to the KMS diagnostic problem, demonstrating the feasibility of recovering internal KMS states from a limited measurement set using expert data. The model's practical validation at an industrial enterprise reveals that the key observable factors of the KMS are knowledge formalization, knowledge-sharing intensity, and knowledge-sharing culture. Limitations in the observability of absorptive capacity and knowledge relevance within the employed measurement framework are identified. The practical significance of the study is to provide organizations with a quantitative auditing tool for KMS and a data-driven framework for optimizing monitoring systems.

Keywords: knowledge management system, observability, structural identifiability, structural model, expert assessment, latent states, weighted least squares, weighting matrix calibration, digital transformation, organizational culture

Citation: Mikhnenko, P. A., & Ermakova, M. V. (2026). Mathematical model and methodology for assessing the structural observability of a knowledge management system: A practical case study at United Engine Corporation (UEC). *Business Informatics*, *20*(3), 90–113. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.90.113

References

1. Cristache, N., Croitoru, G., & Florea, N. V. (2025). The influence of knowledge management on innovation and organizational performance. *Journal of Innovation & Knowledge, 10*(5), 100793. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100793

2. Dedunu, H., Weerasinghe, S., & Wickcramasinghe, A. (2025). Reality is different from what we see: Knowledge management and firm innovation. *Journal of Innovation & Knowledge, 10*(3), 100693. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100693

3. Eromosele, P. O., & Korsakova, T. V. (2024). Knowledge management strategy as a factor of increasing effectiveness and competitiveness of an organization. *Upravlenie v ekonomicheskikh i sotsialnykh sistemakh*, (1(19)), 37–42 (in Russian). https://www.elibrary.ru/download/elibrary_67873816_45973031.pdf

4. Amaechi, C. V., et al. (2025). A systematic literature review on knowledge management for project risk management in construction. *Journal of Building Engineering, 114*, 114261. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114261

5. Zelenkov, Y. A. (2018). The effectiveness of Russian organizations: The role of knowledge management and change readiness. *Russian Journal of Management, 16*(4), 513–536. https://doi.org/10.21638/spbu18.2018.403

6. Sokolov, D. N., & Zavyalova, E. K. (2018). Integration of strategic resources of an organization in the new economy: A conceptual model. *Vestnik of Saint Petersburg University. Management, 17*(1), 46–68 (in Russian). https://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2018.103

7. Kolyasnikov, M. S., & Kelchevskaya, N. R. (2020). Knowledge management strategies in companies: Trends and the impact of Industry 4.0. *Upravlenets, 11*(4), 82–96 (in Russian). https://doi.org/10.29141/2218-5003-2020-11-4-7

8. Jiang, Z., Shi, J., & Liu, Z. (2025). Digital transformation, knowledge management, and ambidextrous innovation in the high-speed train industry in China: The role of TMT's digital knowledge. *Journal of Business Research, 200*, 115634. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2025.115634

9. Zhang, R. (2025). Moderating effect of knowledge entrepreneurship in the relationship between knowledge management process and entrepreneurial success. *Journal of Innovation & Knowledge, 10*(4), 100752. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100752

10. Nakash, M., & Bolisani, E. (2025). Making knowledge management transparent: A new perspective on KM processes integration in the organizational framework. *Business Process Management Journal, 31(*8), 49–66. https://doi.org/10.1108/BPMJ-07-2024-0566

11. Gavrilova, T. A., Kuznetsova, A. V., Alkanova, O. N., & Grinberg, E. Y. (2024). Visualization of employee competencies using knowledge maps. *Russian Journal of Management*, *22*(1), 86–112. (In Russian). https://doi.org/10.21638/spbu18.2024.104

12. Azyabi, N. G. (2018). The impact of knowledge management capabilities and processes on SME performance. *Business Informatics, 12*(3), 39–52. https://doi.org/10.17323/1998-0663.2018.3.39.52

13. Blagov, E. Y., & Shcherban, S. A. (2019). Managing organizational forgetting: The case of Russian machine-building companies. *Vestnik of Saint Petersburg University. Management, 18*(2), 261–287. (In Russian). https://doi.org/10.21638/11701/spbu08.2019.205

14. Starikov, D. A. (2025). A model for evaluating the effectiveness of knowledge management systems in high-technology companies. *Vestnik Evraziyskoy Nauki, 17*(s2) (in Russian). https://esj.today/PDF/100FAVN225.pdf

15. Parshintsev, A. A., & Bogdanova, M. V. (2022). Development of methodological support for the effective development of intellectual capital in the knowledge management system of high-tech project-oriented companies. *Upravlencheskiy uchet,* (2), 146–152 (in Russian). https://uprav-uchet.ru/index.php/journal/article/view/1663/1125

16. Dneprovskaya, N. V., & Shevtsova, I. V. (2023). A knowledge management system in the strategic development of universities. *Business Informatics, 17*(2), 20–40. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.2.20.40

17. Kalabina, E. G., & Belyak, O. Y. (2021). Knowledge-sharing factors in the management of cross-functional teams. *Russian Journal of Management, 19*(4), 515–547 (in Russian). https://doi.org/10.21638/spbu18.2021.407

18. Slavin, B. B. (2022). Technologies of collective intelligence in the management of business processes of an organization. *Business Informatics, 16*(2), 36–48. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.2.36.48

19. Karayev, R. A., & Sadikhova, N. Y. (2020). The advantages of cognitive approach for enterprise management in modern conditions. *Business Informatics, 14*(2), 36-47. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.2.36.47

20. Zelenkov, Y. A. (2024). Organizational knowledge management and large language models. *Russian Journal of Management, 22*(3), 573–601 (in Russian). https://doi.org/10.21638/spbu18.2024.309

21. Kuchumov, I. V. (2024). Algebraic models of data and knowledge representation in modern database management systems. *Computational Nanotechnology, 11*(1), 78–84 (in Russian). https://doi.org/10.33693/2313-223X-2024-11-1-78-84

22. Miroshnichenko, M. A. (2024). The impact of artificial intelligence on the efficiency of document and knowledge management in the banking sector. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya, 3*(53), 552–557 (in Russian). https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-iskusstvennogo-intellekta-na-effektivnost-upravleniya-dokumentami-i-znaniyami-v-bankovskoy-sfere

23. Trofimova, N. N. (2024). The impact of knowledge management on improving the efficiency of business operations management. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya, 6*(3), 151–157 (in Russian). https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.03.06.019

24. Latukha, M. O., Selivanovskikh, L. V., & Mitskevich, E. A. (2019). Talent management practices and absorptive capacity of Russian companies. *Russian Journal of Management, 17*(1), 5–28 (in Russian). https://cyberleninka.ru/article/n/praktiki-upravleniya-talantlivymi-sotrudnikami-i-pogloschayuschaya-sposobnost-rossiyskih-kompaniy

25. Pleshkova, A. Y. (2024). Knowledge management practices in Russian educational organizations. *Russian Journal of Management, 22*(1), 113–130 (in Russian). https://doi.org/10.21638/spbu18.2024.105

26. Popov, E. V., & Aksenova, T. V. (2019). Main trends in knowledge management theory. *University Management: Practice and Analysis, 23*(3), 14–29 (in Russian). https://doi.org/10.15826/umpa.2019.03.016

27. Antonets, V. A. (2018). Segmentation of the market for knowledge extraction, creation, dissemination, and practical application. *University Management: Practice and Analysis, 22*(5), 9–21 (in Russian). https://doi.org/10.15826/umpa.2018.05.045

28. Babin, E. N. (2018). Digitalization of the university: Building an integrated information environment. *University Management: Practice and Analysis, 22*(6), 44–54 (in Russian). https://doi.org/10.15826/umpa.2018.06.057

About the authors

Pavel Aleksandrovich Mikhnenko

Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor;

Professor, Department of Business Informatics, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia;

Email: pmihnenko@bmstu.ru

ORCID: 0000-0002-1766-8029

Maria Vasilevna Ermakova

Leading Specialist, R&D Personnel Development Management Department, Knowledge Management and R&D Personnel Development Department, United Engine Corporation (UEC), 16 Budyonny Ave., Moscow 105118, Russia;

PhD student, Department of Business Informatics, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia;

Email: ermakovamvv@mail.ru

ORCID: 0009-0000-4054-7201

DOI: 10.17323/2587-814X.2026.3.114.133

Двухэшелонная задача маршрутизации в лесопромышленной логистике с нелинейной функцией стоимости: модифицированный алгоритм муравьиной колонии на транспортном графе с транзитными вершинами

Родион Сергеевич Рогулин
Email: rafassiaofusa@mail.ru

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

Аннотация

Рассматривается задача планирования перевозок лесопродукции из пункта отправки через сеть промежуточных перегрузочных центров к конечным потребителям по реальной дорожной сети. Ключевой особенностью постановки является учет того, что удельные затраты на километр пробега зависят от загрузки транспортного средства нелинейно: частично загруженные автомобили обходятся экономике отрасли дороже в пересчете на единицу перевезенного груза. Цель исследования – предложить математическую модель такой двухуровневой логистической задачи и алгоритм ее решения, пригодный для применения на транспортных сетях реальных размеров. Для решения разработана модифицированная версия алгоритма муравьиной колонии – биоинспирированного метода оптимизации, способного согласованно оптимизировать маршруты обоих уровней доставки. Предложенный алгоритм сравнивается с тремя эталонными подходами: точным решением методом смешанного целочисленного линейного программирования, его нижней границей и простой жадной эвристикой «ближайшего соседа». Эксперименты проводились на учебном сценарии с пятьюдесятью потребителями и на реальной дорожной сети Приморского края из 203 вершин. Предложенный алгоритм оказался лучше жадной эвристики

* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

в 49 случаях из 50 со средним улучшением около 7,7% и лучше точного метода в 76 случаях из 80. На реальной дорожной сети Приморского края улучшение относительно жадной эвристики составило около 7%, а результаты алгоритма устойчивы: разброс между запусками не превышал 1%. Практическая значимость работы – применимость модели и алгоритма к планированию перевозок в лесопромышленном комплексе и в других отраслях с разветвленной сетью доставки.

Ключевые слова: двухуровневая задача маршрутизации, нелинейная функция стоимости, алгоритм муравьиной колонии, транспортная логистика лесопромышленного комплекса, планирование перевозок, транспортный граф с промежуточными узлами

Цитирование: Рогулин Р. С. Двухэшелонная задача маршрутизации в лесопромышленной логистике с нелинейной функцией стоимости: модифицированный алгоритм муравьиной колонии на транспортном графе с транзитными вершинами // Бизнес-информатика. 2026. Т. 20. № 3. С. 114–133. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.114.133

Введение

Лесопромышленный комплекс – одна из ключевых отраслей экспорта Российской Федерации, логистика вывоза лесопродукции остается значимой статьей себестоимости. Характерные особенности отрасли – пространственная распределенность объектов, многоуровневая транспортная сеть и нелинейная зависимость удельных затрат от уровня загрузки транспортного средства. Эффективное планирование перевозок требует оптимизационной постановки, одновременно учитывающей двухэшелонную структуру цепочки поставок (депо → хабы → потребители) и нелинейный характер функции стоимости.

Настоящая работа ставит целью разработку и экспериментальную апробацию математической модели двухэшелонной задачи маршрутизации, в которой функция стоимости зависит от уровня загрузки транспортного средства квадратичным образом (через коэффициент нелинейности λ), и соответствующего эвристического алгоритма муравьиной колонии (2E-ACO), способного эффективно находить качественные решения для задач практически значимых масштабов. Особенностью подхода является то, что задача решается непосредственно на реальном взвешенном графе транспортной сети Приморского края с учетом транзитных вершин и собственной топологии, а не на аппроксимации в виде полного графа или евклидовой метрики. Отметим, что в настоящей модели явно не учитывается временная составляющая перевозки (время в пути, окна обслуживания): данная постановка сосредоточена на стоимостной оптимизации и оставляет временные аспекты для отдельного исследования.

Ранее авторами была предложена базовая линейная версия алгоритма 2E-ACO для двухэшелонной транспортной задачи лесопромышленного комплекса [1]. Настоящая работа развивает эту линию исследований четырьмя содержательными расширениями, составляющими ее научную новизну: (1) введение и формальное определение нелинейной функции стоимости с коэффициентом λ, отражающим зависимость удельной стоимости перевозки от загрузки транспортного средства; (2) перенос экспериментов с синтетических задач на реальный транспортный граф Приморского края из 203 вершин и 409 ребер с диаметром 133,6 км; (3) систематическое сравнение 2E-ACO с точной декомпозицией на основе MILP-решателя HiGHS и с нижней границей LP-релаксации; (4) расширенный экспериментальный протокол, включающий анализ чувствительности к гиперпараметрам на 180 комбинациях, абляционное исследование компонентов алгоритма и чувствительность к коэффициенту нелинейности λ с применением парного критерия Вилкоксона для всех сравнений.

Предложенный алгоритм 2E-ACO сочетает классическую схему муравьиной оптимизации с несколькими модификациями, заимствованными из современной теории метаэвристик для задач VRP. В частности, используются две независимые фero-

монные матрицы τ_1 и τ_2 (для магистрального и распределительного эшелонов), правило выбора вершины ACS с параметром q_0, ограничения феромона по схеме MMAS Штютцле–Хоос, стратегия «элитного муравья» для закрепления глобально лучшего решения и локальный поиск 2-opt для шлифовки маршрута первого эшелона. Все компоненты алгоритма в настоящей работе описаны в явной математической форме с правилами обновления, условиями срабатывания и значениями параметров по умолчанию; приведен полный псевдокод.

Структура изложения: раздел 1 – постановка задачи, раздел 2 – обзор литературы, раздел 3 – цель и задачи исследования, раздел 4 – математическая модель (нелинейная функция стоимости и правило распределения объемов первого эшелона), раздел 5 – алгоритм 2E-ACO (правила обновления феромона и локального поиска), раздел 6 – интеграция графовой структуры с алгоритмом, раздел 7 – экспериментальные результаты серий E1–E11, Заключение – заключение с ограничениями и направлениями дальнейших исследований. Практическая значимость – применимость модели и алгоритма к задачам планирования перевозок в лесопромышленной логистике и других отраслях с распределенной инфраструктурой доставки.

1. Постановка задачи

Рассматривается задача двухэшелонной транспортной логистики лесопромышленного комплекса. Магистральный эшелон описывает обход хабов-перегрузочных центров из депо с возвратом в депо (структура, эквивалентная задаче коммивояжера); распределительный эшелон – доставку груза от активных хабов к потребителям транспортными средствами ограниченной вместимости. Транспортная сеть представляется взвешенным ориентированным графом с выделенными транзитными вершинами, которые определяют реальную топологию дорожной инфраструктуры и участвуют в расчете кратчайших путей, но не являются ни источниками, ни получателями груза.

Цель – минимизация суммарных транспортных издержек при ограничениях по вместимости транспортных средств, пропускной способности хабов и покрытию спроса потребителей; неудовлетворенный спрос штрафуется. Детальная математическая модель приведена в разделе 4, алгоритм решения – в разделе 5.

2. Обзор литературы

Задачи маршрутизации транспортных средств (Vehicle Routing Problem, VRP) образуют классический раздел исследования операций и сохраняют высокую практическую актуальность в современных приложениях [2, 3]. Отдельный класс составляют задачи маршрутизации с ограничениями по вместимости транспортных средств – в англоязычной литературе такие задачи обозначаются как Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) или «капацитированный VRP»; их алгоритмическая сложность экспоненциально возрастает с числом потребителей, поэтому для крупномасштабных постановок активно развиваются специализированные эвристики и гибридные метаэвристики: генетические алгоритмы для капацитированного VRP [4], фреймворки декомпозиции для задач с одновременным приемом и доставкой [5], сравнительные исследования современных решений на общедоступных тестовых наборах (CVRPLIB) [6]. Многоэшелонные постановки, учитывающие наличие промежуточных узлов перегрузки, существенно усложняют задачу как с точки зрения формулировки, так и с точки зрения алгоритмического решения. В большинстве известных работ транспортная сеть аппроксимируется полным графом либо транзитные вершины учитываются неявно через предварительно вычисленные расстояния, что снижает адекватность модели для реальных инфраструктурных сетей.

Алгоритмы муравьиной колонии (Ant Colony Optimization, ACO) [7] представляют собой один из наиболее распространенных классов био-инспирированных метаэвристик для решения комбинаторных задач и применяются в задачах коммивояжера [8], маршрутизации транспортных средств [9, 10] и поиска путей на графах [11]. Ключевыми направлениями развития ACO являются модификации правил обновления феромона и стратегий стохастического отбора: двумерные феромонные представления [12] и адаптивные стратегии подкрепления [13] повышают устойчивость и качество найденных решений. Применение ACO в задачах транспортной логистики – в том числе «зеленой» маршрутизации с учетом выбросов – рассмотрено в обзоре [14] и практических исследованиях [15]. При этом большинство существующих ACO-постановок ориентированы на однородные задачи (одиночный VRP или TSP); попытки применения к многоэшелонным задачам, как правило, сводятся к последовательной оптимизации отдельных уровней.

Логистика лесопромышленного комплекса характеризуется высокой пространственной распределенностью объектов и значительной долей транспортных издержек в себестоимости продукции. Оптимизационные модели применяются для планирования интермодальной перевозки древесины с учетом неопределенности [16] и для планирования лесовозных маршрутов с использованием пчелиных алгоритмов [17]; обзоры рассматривают место искусственного интеллекта в отраслевой логистике [18] и цифровизацию лесных цепей поставок [19, 20]. Эмпирические исследования и аналитические модели расхода топлива грузовых автомобилей показывают, что удельные транспортные издержки нелинейно зависят от полной массы транспортного средства и, следовательно, от уровня его загрузки [21, 22].

Несмотря на значительный объем работ в перечисленных областях, в литературе отсутствуют постановки, одновременно обладающие всеми следующими свойствами: двухэшелонная структура с раздельной оптимизацией магистрального и распределительного уровней, явный учет транзитных вершин на транспортном графе, нелинейная функция стоимости, учитывающая зависимость удельных затрат от загрузки транспортного средства, и экспериментальная проверка на реальном графе региона. Отдельные компоненты такой постановки рассматривались авторами в предыдущих работах [23–25]; базовый двухэшелонный алгоритм муравьиной колонии без нелинейного компонента предложен в [1]. Настоящая работа развивает это направление за счет введения нелинейной функции стоимости, доработанных правил обновления феромона и полного статистического сравнения с базовыми методами.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является разработка двухэшелонной оптимизационной модели транспортной логистики лесопромышленного комплекса с нелинейной функцией стоимости и соответствующего модифицированного алгоритма муравьиной колонии (2E-ACO), обеспечивающего согласованную оптимизацию магистрального и распределительного эшелонов на транспортном графе с транзитными вершинами. Структура дальнейшего изложения соответствует методологии design science: формализация проблемы (раздел 4), проектирование решения (раздел 5), интеграция с графовой структурой (раздел 6) и экспериментальная демонстрация эффективности (раздел 7).

Задачи исследования: (1) формализовать двухэшелонную задачу с нелинейной функцией стоимости и явным учетом графовой топологии; (2) разработать модифицированный 2E-ACO с независимыми феромонными матрицами для первого и второго эшелонов, правилом выбора ACS, ограничениями MMAS, элитной стратегией и локальным поиском 2-opt; (3) провести парное сравнение с точной MILP-декомпозицией, нижней границей LP-релаксации и жадной эвристикой ближайшего соседа; (4) выполнить анализ чувствительности к гиперпараметрам и к коэффициенту нелинейности; (5) провести экспериментальную проверку на реальном транспортном графе Приморского края.

4. Математическая модель

4.1. Исходные данные и структура сети

Рассматривается взвешенный ориентированный граф транспортной сети

$$G = (V, E),$$

где V – множество вершин;

$E \subseteq V \times V$ – множество дуг.

Каждой дуге $(i, j) \in E$ сопоставлена неотрицательная стоимость перемещения $c_{i,j} \geqslant 0$. Транспортная сеть содержит транзитные вершины, через которые допускается движение между «значимыми» вершинами (депо, хабы, потребители).

Множество вершин разбивается на непересекающиеся подмножества:

$$V = \{0\} \cup H \cup C \cup T,$$

где 0 – депо (в данной реализации это I_0);

H – множество хабов (I_1);

C – множество потребителей (I_2);

T – множество транзитных вершин (I_T).

Для корректного учета транзитных вершин далее используется матрица кратчайших расстояний (стоимостей) по графу:

$$d_{ij} = \mathrm{dist}_G(i, j), \quad i, j \in V,$$

где $\text{dist}_G(i, j)$ – длина кратчайшего пути из i в j в смысле весов $c_{(ij)}$. Если j недостижима из i, полагается $d_{ij} = M$, где M – большое штрафное значение.

4.2. Параметры спроса и ресурсов

Каждому потребителю $k \in C$ соответствует спрос $g_k > 0$.

На первом эшелоне действует ограничение на суммарный объем груза, доставленного из депо в систему хабов $Q > 0$.

На втором эшелоне используются одинаковые транспортные средства (ТС) вместимости $q > 0$.

При этом число доступных ТС ограничено: $m \in N$.

4.3. Переменные решения

Первый эшелон (цикл по хабам, коммивояжерная структура) задается гамильтоновым циклом по множеству $\{0\} \cup H$ с возвратом в депо. Вводятся бинарные переменные

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \qquad i, j \in \{0\} \cup H,$$

где $x_{ij} = 1$ означает, что на первом эшелоне осуществляется переход из вершины i в вершину j.

Для распределения потока по хабам (объемы первого эшелона) вводятся непрерывные переменные

$$s_h \geqslant 0, h \in H,$$

где s_h – объем груза, доставляемый из депо в хаб h в рамках первого эшелона. Эти величины интерпретируются как «доступный ресурс» для последующей развозки на втором эшелоне.

Для второго эшелона (маршруты ТС от хабов к потребителям и обратно) вводятся:

- бинарные переменные выбора хаба для каждого ТС:

$$w_{hv} \in \{0,1\}, \qquad h \in H, v = 1, ..., m,$$

где $w_{hv} = 1$ означает, что транспортное средство v стартует из h хаба и возвращается в тот же хаб.

- бинарные маршрутизирующие переменные второго эшелона:

$$y_{ij}^{(v)} \in \{0,1\}, \qquad i, j \in H \cup C, v = 1, ..., m,$$

где $y_{ij}^{(v)} = 1$ означает, что ТС v проходит дугу (i, j) в пространстве «хабы-потребители[1]».

- бинарные переменные обслуживания потребителей:

$$z_k \in \{0,1\}, \qquad k \in C,$$

где $z_k = 1$ означает, что спрос потребителя k обслужен полностью (в текущей логике алгоритма потребитель посещен ровно одним ТС и считается обслуженным целиком).

Для корректного отражения ситуации, когда из-за ограничения m не удается обслужить всех потребителей, вводится штраф за неудовлетворенный спрос (F_p).

4.4. Целевая функция

Минимизируется суммарная стоимость двух эшелонов с учетом штрафа за не обслуженный спрос:

$$\min(F) = \min(F_1 + F_2 + F_p).$$

Стоимость первого эшелона

$$F_1 = \sum_{i \in \{0\} \cup H} \sum_{j \in \{0\} \cup H} d_{ij} x_{ij}.$$

Стоимость второго эшелона (исправленная формулировка) – это суммарная стоимость всех дуг, реально проезжаемых ТС между хабами и потребителями:

$$F_2 = \sum_{v=1}^{m} \sum_{i \in H \cup C} \sum_{j \in H \cup C} d_{ij} y_{ij}^{(v)}.$$

Штраф за неудовлетворенный запрос

$$F_p = \lambda \sum_{k \in C} q_k (1 - z_k),$$

где $\lambda >> 0$ – параметр штрафа, обеспечивающий предпочтение обслуживания спроса при сопоставимых транспортных затратах.

4.4.1. Нелинейная функция стоимости и переопределение стоимости второго эшелона

Для отражения практически важной зависимости удельных затрат на транспортировку от уровня загрузки транспортного средства используется нели-

[1] Замечание: транзитные вершины учтены через d_{ij}

нейная функция стоимости дуги второго эшелона. Пусть c_{km} – удельная стоимость перемещения единицы расстояния при полной загрузке, d_{ij} – кратчайшее расстояние между вершинами i и j в графе транспортной сети, $l_{ij}^{(v)}$ – суммарная масса груза, перевозимая транспортным средством v при прохождении дуги (i, j), Q – максимальная вместимость транспортного средства второго эшелона, λ – коэффициент нелинейности. Фактическая стоимость прохождения дуги транспортным средством v определяется выражением:

$$c_{ij}^{(v)} = c_{\text{km}} \cdot d_{ij} \cdot \left(1 + \lambda \cdot \left(\frac{l_{ij}^{(v)}}{Q}\right)^2\right).$$

Первое слагаемое в скобках соответствует линейной зависимости, второе – квадратично штрафует отклонение загрузки от номинальной. При $\lambda = 0$ модель редуцируется к линейной постановке [1]; при $\lambda > 0$ алгоритм предпочитает маршруты с равномерной загрузкой. В экспериментах использовалось $\lambda = 0{,}30$: такое значение согласуется с моделями расхода топлива грузовых автомобилей [21] и обзором факторов стоимости грузоперевозок [22], а квадратичная добавка при полной загрузке составляет 30% от линейной стоимости, что сохраняет численную устойчивость алгоритма. Чувствительность к λ исследована в эксперименте E11.

Величина $l_{ij}^{(v)}$ зависит от порядка посещения потребителей внутри маршрута транспортного средства v и выражается через спрос обслуженных до прохождения дуги (i, j) потребителей:

$$l_{ij}^{(v)} = \sum_{k \in R_{ij}^{(v)}} q_k,$$

где $R_{ij}^{(v)}$ – упорядоченное множество потребителей, обслуженных до прохождения дуги (i, j). Величина $l_{ij}^{(v)}$ однозначно определяется бинарными маршрутизационными переменными $y_{ij}^{(v)}$ второго эшелона.

С учетом нелинейного компонента стоимость второго эшелона принимает вид:

$$F_2 = \sum_{v=1}^{m} \sum_{(i,j) \in H \cup C} c_{ij}^{(v)} y_{ij}^{(v)}$$

Цели магистрального эшелона F_1 и штрафная функция F_p (см. формулы выше) остаются без изменений. Совокупная целевая функция $F_1 + F_2 + F_p$ сохраняет смысл минимизации полных транспортных затрат.

4.4.2. Формализация эвристического правила распределения объемов s_h

Определяющее правило распределения объемов первого эшелона по хабам было сформулировано выше в описательной форме. Для устранения неоднозначности и обеспечения воспроизводимости результатов ниже приведена его математическая формализация. Пусть $C_h \subseteq C$ – подмножество потребителей, назначенных хабу h процедурой построения маршрутов второго эшелона, $demand_h$ – суммарный спрос этих потребителей, $\sum_{k \in C} q_k$ – общий спрос всех потребителей системы. Тогда объем груза s_h, направляемый с депо в хаб h в рамках магистрального эшелона, определяется как доля хаба в общем спросе, отмасштабированная на общий ресурс Q, и дополнительно ограничивается отрезком $[0, Q]$:

$$s_h = \text{clip}_{[0,Q]}\left(Q \cdot \frac{\sum_{k \in C_h} q_k}{\sum_{k \in C} q_k}\right),$$

где $\text{clip}_{[0,\,Q]}$ – операция обрезания к отрезку $[0, Q]$. Такое правило обеспечивает неотрицательность и ограниченность переменных s_h и автоматически удовлетворяет ограничению $\sum_{h \in H} s_h \leqslant Q$ по построению.

4.5. Ограничения

Ограничения первого эшелона (возврат в депо). Каждый хаб имеет ровно одну входящую и одну исходящую дугу:

$$\sum_{j \in \{0\} \cup H} x_{ij} = 1, \quad \sum_{i \in \{0\} \cup H} x_{ik} = 1, \quad \forall k \in H.$$

Для депо:

$$\sum_{j \in H} x_{0j} = 1, \qquad \sum_{i \in H} x_{i0} = 1.$$

Запрет подциклов (экспоненциальный рост числа ограничений):

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leqslant |S| - 1, \quad \forall S \subseteq H, S \neq \varnothing.$$

Ограничение на общий объем первого эшелона. Поскольку первый эшелон представляет собой единый поток, корректное ресурсное ограничение имеет вид:

$$\sum_{h \in H} s_h \leqslant Q, \; s_h \geq 0, \forall h \in H.$$

Привязка каждого ТС к одному хабу. Каждое ТС либо не используется, либо выбирает ровно один хаб старта:

$$\sum_{h\in H} w_{hv} \le 1, \quad v = 1, \ldots, m.$$

Потоковые ограничения маршрутов второго эшелона. Обозначим множество вершин второго эшелона как $U = H \cup C$.

Баланс потока для потребителей (внутренние вершины маршрута). Для каждого ТС и каждого потребителя $k \in C$:

$$\sum_{j\in U} y_{kj}^{(v)} - \sum_{i\in U} y_{ik}^{(v)} = 0.$$

Это обеспечивает условие, что, если потребитель посещен данным ТС, то вход и выход согласованы.

Старт и финиш ТС в выбранном хабе. Для каждого ТС v и хаба $h \in H$:

$$\sum_{j\in U} y_{hj}^{(v)} = w_{hv}, \ \sum_{i\in U} y_{ih}^{(v)} = w_{hv}.$$

То есть если $w_{hv} = 1$, то у ТС есть ровно один выход h из и ровно один вход в h, если $w_{hv} = 0$, то ТС не образует маршрут из этого хаба.

Ограничения обслуживания потребителей. Потребитель обслуживается не более одного раза (полное обслуживание одним ТС):

$$\sum_{v=1}^{m} \sum_{i\in U} y_{ik}^{(v)} = z_k, \ \forall k \in C.$$

Ограничение вместимости ТС второго эшелона. Для каждого ТС суммарный спрос обслуженных им потребителей не превышает вместимость:

$$\sum_{k\in C} q_k \left(\sum_{i\in U} y_{ik}^{(v)} \right) \leqslant Q_v, \quad v = 1, \ldots, m.$$

Ограничение доступности объема в хабах. Объем, развозимый из хаба, не должен превышать доставленный на первый эшелон ресурс. Для каждого хаба $h \in H$:

$$\sum_{v=1}^{m} \sum_{k\in C} q_k \left(\sum_{i\in U} y_{ik}^{(v)} \right) \cdot \delta_{hv} \leqslant s_h.$$

где $\delta_{hv}(v)$ – индикатор того, что ТС v закреплено за хабом h, то есть $\delta_{hv}(v) = w_{hv}$.

В компактном виде:

$$\sum_{v=1}^{m} w_{hv} \left(\sum_{k\in C} q_k \sum_{i\in U} y_{ik}^{(v)} \right) \leqslant s_h \ , \forall h \in H.$$

4.6. Класс сложности и обоснование метаэвристики

Даже при фиксированном распределении потоков между хабами оптимизация маршрута первого эшелона сводится к задаче коммивояжера, а формирование маршрутов второго эшелона – к капацитированному VRP; добавление нелинейной функции стоимости сохраняет NP-трудность задачи. Точные методы становятся вычислительно неприемлемыми уже при умеренных размерностях (см. раздел 7.4), что обосновывает выбор метаэвристического подхода, описанного в разделе 5.

5. Алгоритм поиска решения (двухэшелонный алгоритм муравьиной колонии, 2E-ACO)

5.1. Общая схема алгоритма

Для решения сформулированной двухэшелонной транспортной задачи предлагается двухуровневый алгоритм муравьиной колонии (Two-Echelon Ant Colony Optimization, 2E-ACO), который итеративно строит допустимые решения, состоящие из:

1) маршрута первого эшелона (обход хабов с возвратом в депо);
2) набора маршрутов второго эшелона (разводка от хабов к потребителям с учетом вместимости транспортных средств).

Ключевая особенность алгоритма заключается в разделении феромонной памяти и процедур построения решений для первого и второго эшелонов, при этом оценка качества решения производится по единой целевой функции:

$$F = F_1 + F_2 + F_p.$$

Алгоритм относится к классу метаэвристик и не гарантирует нахождение глобального оптимума, однако обеспечивает эффективный поиск высококачественных решений для NP-трудной задачи.

5.2. Феромонные структуры и эвристическая информация

Для каждого эшелона вводится собственная феромонная матрица.

Феромонная матрица первого эшелона:

$$\tau^{(1)} = (\tau_{ij}^{(1)}); \ i, j \in \{0\} \cup H,$$

где $\tau_{ij}^{(1)}$ отражает «привлекательность» включения дуги (i, j) в маршрут первого эшелона.

Эвристическая информация:

$$\eta_{ij}^{(1)} = \frac{1}{d_{ij} + \varepsilon},$$

где d_{ij} – кратчайшее расстояние между вершинами;

$\varepsilon > 0$ – малое число для предотвращения деления на ноль.

Феромонная матрица второго эшелона:

$$\tau^{(2)} = (\tau_{ij}^{(2)});\ i, j \in H \cup C,$$

которая используется при построении маршрутов транспортных средств от хабов к потребителям.

Эвристическая информация второго эшелона:

$$\eta_{ij}^{(2)} = \frac{1}{d_{ij} + \varepsilon}.$$

5.3. Построение решения муравьем

Каждый муравей в рамках одной итерации последовательности строит решение обоих эшелонов.

Построение маршрута первого эшелона представляет собой вероятностную процедуру формирования гамильтонова цикла по множеству $\{0\} \cup H$.

Пусть муравей находится в вершине i. Тогда вероятность выбора следующей вершины $j \in H$, еще не посещенной данным муравьем, определяется выражением:

$$P_{ij}^{(1)} = \frac{\left(\tau_{ij}^{(1)}\right)^{\alpha} \left(\eta_{ij}^{(1)}\right)^{\beta}}{\sum_{k \in H_{\text{доступ}}} \left(\tau_{ik}^{(1)}\right)^{\alpha} \left(\eta_{ik}^{(1)}\right)^{\beta}},$$

где:

$H_{\text{доступ}}$ – множество еще не посещенных хабов;

$\alpha, \beta > 0$ – – параметры, задающие относительную важность феромона и эвристики.

С вероятностью q_0 применяется жадный выбор (вершина с максимальным значением числителя), иначе используется стохастический выбор по распределению $P_{ij}^{(1)}$.

После посещения всех хабов маршрут замыкается возвратом в депо.

На основе полученного маршрута первого эшелона определяется распределение объема Q по хабам s_h:

$$\sum_{h \in H} s_h \leqslant Q.$$

В текущей реализации используется эвристическое правило, согласно которому хабы, включенные в маршрут первого эшелона, получают приоритетную долю потока, после чего выполняется масштабирование для соблюдения ограничения по Q. Данное распределение используется как верхнее ограничение ресурсов для второго эшелона.

Для заданных значений s_h муравей формирует маршруты транспортных средств второго эшелона. Процедура включает следующие шаги:

(1) Выбор активных хабов. Рассматриваются хабы $h \in H$, для которых $s_h > 0$.

(2) Назначение потребителей хабам. Каждый потребитель $k \in C$ назначается одному из активных хабов на основе минимизации расстояния d_{nk} с учетом доступного ресурса s_h.

(3) Формирование маршрутов ТС. Для каждого хаба строится набор маршрутов транспортных средств, каждый из которых:

- стартует и заканчивается в данном хабе;
- обслуживает набор потребителей;
- удовлетворяет ограничению вместимости $\sum_{k \in C} q_k \leqslant q$.

Последовательность посещения потребителей внутри маршрута определяется либо жадно по расстояниям, либо с использованием вероятностного выбора на основе $\tau^{(2)}$ и $\eta^{(2)}$.

Если из-за ограничения не удается обслужить всех потребителей, необслуженный спрос учитывается через штраф F_p.

5.4. Оценка решения

Для каждого муравья вычисляется значение целевой функции:

$$F = F_1 + F_2 + F_p,$$

где:

F_1 – стоимость маршрута первого эшелона

F_2 – суммарная стоимость

F_p – штраф за необслуженный спрос.

5.5. Обновление феромонов

После каждой итерации выполняется испарение феромонов:

$$\tau_{ij}^{(e)} \leftarrow (1-\rho)\,\tau_{ij}^{(e)},\ e \in \{1,2\},$$

где $\rho \in (0,1)$ – коэффициент испарения.

Феромон усиливается вдоль дуг, принадлежащих лучшему решению итерации:

$$\tau_{ij}^{(1)} \leftarrow \tau_{ij}^{(1)} + \frac{Q_\tau}{F^{\text{best}}}, (i,j) \in tour_1^{\text{best}},$$

$$\tau_{ij}^{(2)} \leftarrow \tau_{ij}^{(2)} + \frac{Q_\tau}{F^{\text{best}}}, (i,j) \in tour_2^{\text{best}},$$

где $Q_\tau > 0$ – параметр интенсивности отложения феромона.

Дополнительно феромонные значения ограничиваются диапазоном:

$$\tau_{\min} \leqslant \tau_{\min}^{(e)} \leqslant \tau_{\max}.$$

5.6. Уточненные правила обновления феромона и локального поиска

Правило выбора следующей вершины на первом эшелоне следует логике ACS (Ant Colony System) [26]: при каждом выборе генерируется равномерное случайное число $q \in [0, 1]$. Если $q \leqslant q_0$, муравей использует жадную стратегию и выбирает вершину с максимальным комбинированным значением феромона и эвристики; в противном случае используется стохастический выбор по распределению $P_{ij}^{(1)}$, приведенному выше. Формально жадный выбор определяется выражением:

$$j^* = \operatorname{argmax}\left(\tau_{ik}^1\right)^\alpha \cdot \left(\eta_{ik}^1\right)^\beta, \text{ при } q \leqslant q_0,$$

иначе ранее введенное распределение $P_{ij}^{(1)}$ применяется как стохастический пропорциональный выбор. В экспериментах работы значение по умолчанию $q_0 = 0{,}2$, то есть в 30% случаев муравей выбирает жадно, а в 70% – стохастически, что обеспечивает баланс между интенсификацией и исследованием пространства решений.

На шаге интенсификации отдельно обновляются обе феромонные матрицы: τ_1 – вдоль дуг лучшего на итерации магистрального маршрута $tour_1^{\text{best}}$, τ_2 – вдоль дуг лучшего на итерации набора маршрутов второго эшелона $tour_2^{\text{best}}$. Правило усиления τ_2 имеет корректный вид:

$$\tau_{ij}^2 \leftarrow \tau_{ij}^2 + \frac{Q_\tau}{F^{\text{best}}},$$

где F^{best} – значение целевой функции лучшего решения итерации. Ключевое отличие от линейного правила состоит в том, что обе матрицы τ_1 и τ_2 обновляются независимо и сохраняют собственную динамику; это позволяет одновременно обучать «магистральную» привлекательность дуг между хабами и «распределительную» привлекательность дуг между хабами и потребителями.

Для предотвращения преждевременной сходимости применяется схема MMAS (Max-Min Ant System) [27]: значения феромона после испарения и интенсификации обрезаются к отрезку $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ на каждой итерации и для каждой матрицы:

$$\tau_{ij}^{(e)} \leftarrow \text{clip}_{[\tau_{\min}, \tau_{\max}]}\left(\tau_{ij}^e\right), e \in \{1, 2\}.$$

В работе принято $\tau_{\min} = 10^{-4}$, $\tau_{\max} = 10$. Нижняя граница $\tau_{\min}$ гарантирует, что вероятность выбора любой дуги не сводится к нулю, а верхняя граница $\tau_{\max}$ ограничивает одностороннее накопление феромона на доминирующих дугах, что расширяет исследование пространства решений на поздних итерациях.

Дополнительно используется стратегия «элитного муравья» (elite strategy): на каждой итерации к феромону, отложенному итерационно лучшим муравьем, добавляется вклад глобального лучшего решения с весом $w_{\text{elite}} > 0$:

$$\tau_{ij}^{(e)} \leftarrow \tau_{ij}^{(e)} + w_{\text{elite}} \cdot \frac{Q_\tau}{F^{\text{gb}}},$$

где F^{gb} – значение целевой функции глобально лучшего решения, найденного за все время работы алгоритма. В работе принято $w_{\text{elite}} = 1$. Эффект элитной стратегии состоит в том, что алгоритм сохраняет память о лучшем решении даже если на некоторых итерациях оно временно уступает по качеству случайному муравью, что стабилизирует сходимость.

Локальный поиск 2-opt применяется к маршруту первого эшелона каждые 50 итераций, начиная с итерации 50, и только к наилучшему на итерации решению. Процедура последовательно перебирает все пары несмежных дуг $(i, i + 1)$ и $(j, j + 1)$ в текущем гамильтоновом цикле магистрального эшелона и заменяет их на дуги (i, j) и $(i, j + 1)$, если образующийся маршрут имеет меньшую суммарную длину. Перебор повторяется до тех пор, пока хотя бы одно улучшение было найдено. Выбор периодичности в 50 итераций основан на медианном значении числа итераций до лучшего решения (см. эксперимент E10), равном 95: к моменту первого срабатывания 2-opt половина решений уже сошлась, а к моменту второго – большинство.

5.7. Псевдокод алгоритма 2E-ACO

Полный алгоритм в виде псевдокода приведен ниже. Здесь n_{ants} – число муравьев на итерацию, n_{iter} – максимальное число итераций, t_{stag} – счетчик итераций без улучшения глобального решения, используемый для ранней остановки.

Input: транспортный граф G, спрос q, вместимости Q, параметры $\alpha, \beta, \rho, q_0, \lambda, \tau_{min}, \tau_{max}, n_{ants}, n_{iter}$.

Output: лучшее найденное решение ($tour_1$, $tour_2$, s, z) со значением целевой функции F.

1. Инициализировать τ_1 и τ_2 значениями τ_{max}.
2. Инициализировать $F^{gb} := +\infty$, $t_{stag} := 0$.
3. для t от 1 до n_{iter}:
4. для каждого муравья $a = 1, ..., n_{ants}$:
5. $tour_1$:= BUILD_FIRST_ECHELON(τ_1, α, β, q_0); s := CLIP_TO_HUB_CAPACITIES;
   $tour_2$:= BUILD_SECOND_ECHELON(τ_1, s, τ_2, α, β);
6. $F_a := F_1(tour_1) + F_2(tour_2, \lambda) + F_p(z)$;
7. выбрать лучшего муравья итерации a^* со значением F^{ib};
   обновить F^{gb}, $tour_1^{gb}$, $tour_2^{gb}$ при $F^{ib} < F^{gb}$, иначе $t_{stag} += 1$;
8. $\tau_1 := (1 - \rho)\,\tau_1$; $\tau_2 := (1 - \rho)\,\tau_2$ (испарение);
9. для $(i, j) \in tour_1^{a^*}$: $\tau_{ij}^1 += Q_\tau / F^{ib}$;
   для $(i, j) \in tour_2^{a^*}$: $\tau_{ij}^2 += Q_\tau / F^{ib}$ (интенсификация по лучшему итерации);
10. для $(i, j) \in tour_1^{gb}$: $\tau_{ij}^1 += w_{elite} \cdot Q_\tau / F^{gb}$;
    для $(i, j) \in tour_2^{gb}$: $\tau_{ij}^2 += w_{elite} \cdot Q_\tau / F^{gb}$ (элитный муравей);
11. $\tau_1 := clip_{[\tau_{min}, \tau_{max}]}(\tau_1)$; $\tau_2 := clip_{[\tau_{min}, \tau_{max}]}(\tau_2)$ (обрезание MMAS);
12. если t mod 50= 0 and $t > 0$,
    то $tour_1^{a^*} :=$ TWO_OPT($tour_1^{a^*}$);
13. если $t_{stag} \geqslant$ stagnation_limit, прервать;
14. вернуть ($tour_1$)($tour_1^{gb}$, $tour_2^{gb}$, F^{gb}).

Через фиксированное число итераций к текущему лучшему решению применяется процедура локального поиска, включающая:

- Перестановки хабов в маршруте первого эшелона;
- Перераспределение объемов s_h;
- Перестроение маршрутов второго эшелона.

5.8. Критерий остановки

Алгоритм завершается после выполнения заданного числа итераций или при отсутствии улучшений в течение фиксированного числа шагов.

6. Интеграция графовых и эвристических подходов

Особенностью рассматриваемой задачи является необходимость одновременного учета реальной транспортной инфраструктуры и комбинаторной природы оптимизационного поиска. Транспортная сеть представляется взвешенным ориентированным графом, на основе которого вычисляется матрица кратчайших расстояний между всеми «значимыми» вершинами (депо, хабы, потребители) с учетом транзитных вершин. Полученная матрица используется как базовый слой для оценки стоимости маршрутов обоих эшелонов алгоритма 2E-ACO и позволяет явно учитывать реальную топологию сети вместо аппроксимации расстояний евклидовой метрикой.

Модифицированный алгоритм муравьиной колонии использует графовую информацию на всех этапах построения решений: эвристическая привлекательность дуг определяется обратной величиной кратчайшего расстояния, стоимость каждого маршрута вычисляется суммированием стоимостей дуг исходного графа вдоль кратчайшего пути, а нелинейный компонент стоимости (раздел 4) применяется к каждой дуге с учетом фактической загрузки транспортного средства. Такой механизм интеграции позволяет рассматривать оптимизационную задачу непосредственно на реальной транспортной сети, что повышает интерпретируемость и практическую применимость получаемых решений; корректность подхода и согласованная работа двух эшелонов подтверждаются экспериментальным материалом раздела 7.

7. Экспериментальные результаты

7.1. Опытная установка и исходные данные

Экспериментальные исследования предложенной модели и алгоритма 2E-ACO проводились на двух семействах транспортных графов. Первое семейство включает синтетические графы с программно управляемым числом потребителей C, числом

хабов H и числом транзитных вершин n_T, что позволяет изолированно изучать чувствительность алгоритма к структурным параметрам задачи. Второе семейство представлено реальным взвешенным графом автомобильной дорожной сети Приморского края Российской Федерации (представлен на *рис. 1*). Этот граф содержит 203 вершины (1 депо, 10 хабов, 20 потребителей и 172 транзитные вершины, соответствующие населенным пунктам и узлам автомобильной сети региона) и 409 неориентированных ребер, исходно образующих четыре компоненты связности; перед запуском алгоритма процедура обеспечения связности ensure_connectivity объединяет эти компоненты, после чего диаметр кратчайших расстояний составляет 133,6 км. Суммарный спрос на 20 потребителях равен условным 100 единицам товара; вместимость транспортного средства второго эшелона принималась $Q = 10$, число доступных транспортных средств второго эшелона $m = 6$.

Численные эксперименты выполнялись на рабочей станции Apple MacBook Pro (процессор Apple M1 Max, 10 ядер, ОЗУ 64 ГБ) в среде MATLAB R2024b с включенным набором из 8 параллельных рабочих процессов (parfor). Каждая конфигурация эксперимента запускалась на фиксированном наборе случайных запусков для обеспечения воспроизводимости и корректного применения парных статистических критериев. В базовом сценарии число запусков равно 50, в расширенных – от 30 до 100 в зависимости от вычислительной стоимости конфигурации.

Значения параметров 2E-ACO по умолчанию принимались следующими: $\alpha = 1$, $\beta = 4$, $\rho = 0{,}1$, $q_0 = 0{,}2$, число муравьев $n_{\text{ants}} = 30$, число итераций $n_{\text{iter}} = 200$, нижняя и верхняя границы феромона MMAS $\tau_{\min} = 10^{-4}$ и $\tau_{\max} = 10$, коэффициент интенсификации $Q_\tau = 1$, локальный поиск 2-opt применяется к лучшему решению итерации каждые 50 итераций, коэффициент штрафа за необслуженный спрос $\lambda_{\text{penalty}} = 10^5$. Коэффициент нелинейности функции стоимости принимался $\lambda = 0{,}30$, если не указано иное; физический смысл параметра пояснен в разделе математической модели.

7.2. Эталонные алгоритмы и метрики сравнения

Для объективной оценки качества решений использовались три эталонных алгоритма. Первый – жадная эвристика «ближайшего соседа» (NN + greedy), которая строит маршрут первого эшелона обходом хабов по возрастанию евклидова расстояния и распределяет потребителей между хабами по минимальному плечу второго эшелона. Второй – точная декомпозиция задачи на последовательно решаемые MILP (решателем HiGHS через интерфейс intlinprog): сначала решается подзадача коммивояжера по хабам, затем подзадача назначения потребителей и маршрутизации второго эшелона. Третий – LP-релаксация задачи назначения потребителей хабам, дающая доказуемую нижнюю границу стоимости обслуживания спроса на втором эшелоне.

Сравнение с иными метаэвристиками (генетические алгоритмы, имитация отжига, рой частиц) не проводилось: их стандартные реализации не переносятся на двухэшелонную нелинейную постановку с транзитными вершинами без существенной переработки, а MILP и LP-граница обеспечивают более строгий сертификат качества. Сравнение с альтернативными метаэвристиками отнесено к дальнейшим исследованиям.

Основными метриками сравнения выступали: суммарная целевая функция $F = F_1 + F_2 + F_p$, ее компоненты F_1 (магистральный эшелон), F_2 (распределительный эшелон) и F_p (штраф за необслуженный спрос), доля обслуженных потребителей $served_{\text{ratio}}$, время счета $time_{\text{total}}$ (в секундах) и число итераций до наилучшего найденного решения $n_{\text{iter}\to\text{best}}$. Для сравнения пар распределений целевых функций применялся непараметрический парный критерий знаковых рангов Вилкоксона, возможный на одной и той же последовательности запусков.

7.3. Сравнение 2E-ACO с эвристикой NN (эксперимент E3)

Эксперимент E3 выполнен на базовом синтетическом сценарии ($C = 50$, $H = 10$, $n_T = 172$, $\lambda = 0{,}3$) на 50 запусках. Сводные результаты приведены в *таблице 1* и включают не только средние значения целевой функции, но и медиану, наилучший и наихудший результаты, стандартное отклонение, среднее время счета и долю побед 2E-ACO над NN + greedy по парным запускам. Алгоритм 2E-ACO оказывается лучше эвристики NN на 49 из 50 запусков; среднее относительное улучшение составляет 7,73%, медианное – 7,21%; парный критерий знаковых рангов Вилкоксона (одностороннее «2E-ACO < NN») дает статистику $W = 0$ и $p = 5{,}55 \cdot 10^{-10}$. Разброс результатов 2E-ACO (стан-

Таблица 1.

Сравнение алгоритмов по целевой функции F на базовом синтетическом сценарии

Алгоритм	F_{mean}	F_{med}	F_{best}	F_{worst}	$\sigma(F)$	T_{mean}, с	Побед *vs* NN
NN+greedy	22181,6	22002,6	17771,6	26699,2	1812,0	0,006	–
2E-ACO	20440,6	20558,3	16518,9	25849,6	1610,4	4,330	49 / 50

Примечание: $C = 50$, $H = 10$, $n_T = 172$, 50 запусков; F_{mean} – среднее, F_{med} – медиана, F_{best} и F_{worst} – лучшее и худшее значения, $\sigma(F)$ – стандартное отклонение, T_{mean} – среднее время счета в секундах.

дартное отклонение $\sigma(F) = 1610{,}4$) меньше разброса эвристики NN ($\sigma(F) = 1812{,}0$), что свидетельствует об устойчивости метаэвристики к начальному случайному распределению потребителей между хабами.

2E-ACO строго доминирует над жадной эвристикой по всем метрикам качества; проигрыш по времени счета (~4 с против ~6 мс) практически незначим при выигрыше по стоимости 7,73 %.

7.4. Парное сравнение с MILP-декомпозицией и LP-границей (эксперимент E2)

Эксперимент E2 предназначен для оценки качества решений 2E-ACO относительно точного MILP-решателя HiGHS и нижней границы LP. Использовались задачи небольшого размера $C \in \{10; 15; 20; 25\}$, на которых HiGHS гарантированно сходится за разумное время. Для каждого значения C запускались 20 различных запусков, что в сумме дает 80 парных сравнений. Нижняя граница LP вычисляется из релаксации задачи назначения потребителей хабам без ограничений на целочисленность, что обеспечивает корректную нижнюю оценку стоимости второго эшелона. Агрегированные показатели приведены в *таблице 2.*

Парные критерии знаковых рангов Вилкоксона дают $p = 9{,}82 \cdot 10^{-15}$ против MILP-декомпозиции и $p = 5{,}74 \cdot 10^{-15}$ против жадной эвристики. Превосходство над MILP-декомпозицией объясняется тем, что она фиксирует маршрут первого эшелона до решения задачи распределения, тогда как 2E-ACO оптимизирует оба уровня согласованно через связанные матрицы τ_1 и τ_2. Средняя доля LP-границы от F_1 составляет 36,05%; LP-граница оценивает только стоимость второго эшелона без магистрального маршрута и нелинейного компонента, поэтому разрыв характеризует структуру задачи, а не является метрикой optimality gap.

7.5. Масштабирование по числу потребителей (эксперимент E1)

Эксперимент E1 оценивает поведение алгоритма при увеличении числа потребителей. Для пяти значений $C \in \{20; 50; 100; 200; 300\}$ при фиксированных $H = 10$, $n_T = 172$ выполнено по 100 запусков на точку (*табл. 3*). Подгонка методом наименьших квадратов дает $T \approx 0{,}163 \cdot C^{0{,}841}$ – сублинейный рост аппаратного времени 200 итераций метаэвристики; закон отражает стоимость оценочных функций на разреженном графе и не характеризует теоретическую сложность NP-трудной задачи.

Таблица 2.

Парное сравнение 2E-ACO, MILP-декомпозиции, нижней границы LP и жадной эвристики на конфигурациях $C \in \{10; 15; 20; 25\}$

Алгоритм	F_{mean}	F_{median}	Улучшение *vs* 2E-ACO, %	Побед 2E-ACO
LP (нижняя граница)	3134,9	3113,0	–62,9	–
2E-ACO	8454,0	8265,7	–	–
MILPdecomp	8932,9	8827,3	+5,19	76 / 80
NN+greedy	8993,6	8872,9	+5,82	79 / 80

Примечание: 20 запусков на каждую конфигурацию (всего 80 наблюдений).

Таблица 3.

Среднее значение целевой функции и среднее время счета алгоритма 2E-ACO при изменении числа потребителей

C	F_{mean}	T_{mean}, с
20	9316,03	2,38
50	20440,56	3,63
100	47305,64	6,97
200	134148,48	14,57
300	268007,78	21,74

Примечание: $H = 10$, $n_T = 172$, 100 запусков на конфигурацию.

Структура транспортной сети Приморского края (эксперименты E7 и E9) показана на *рисунке 1*: звездный знак – депо, ромбы – 10 хабов (H1–H10), кружки – 20 потребителей, серые квадраты – 172 транзитные вершины. Часть потребителей расположена в периферийных районах и достижима только через длинные цепочки транзитных вершин, что делает оптимизацию маршрутов второго эшелона нетривиальной.

7.6. Чувствительность к гиперпараметрам алгоритма (эксперимент E4)

Эксперимент E4 исследует устойчивость алгоритма к выбору параметров α, β, ρ, q_0 на полной сетке из 180 комбинаций ($\alpha \in \{0{,}5;\ 1{,}0;\ 2{,}0\}$, $\beta \in \{2,\ 4,\ 6\}$, $\rho \in \{0{,}05;\ 0{,}1;\ 0{,}2;\ 0{,}3\}$, $q_0 \in \{0;\ 0{,}1;\ 0{,}2;\ 0{,}5\}$) при 50 запусках на комбинацию – всего 9000 запусков. Результаты наилучшей, наихудшей и используемой по умолчанию конфигураций приведены в *таблице 4*. Разброс среднего между лучшей и худшей точками составляет 9,50%; конфигурация по умолчанию занимает 64-ю позицию из 180 и отстает от наилучшей на 2,00%. При

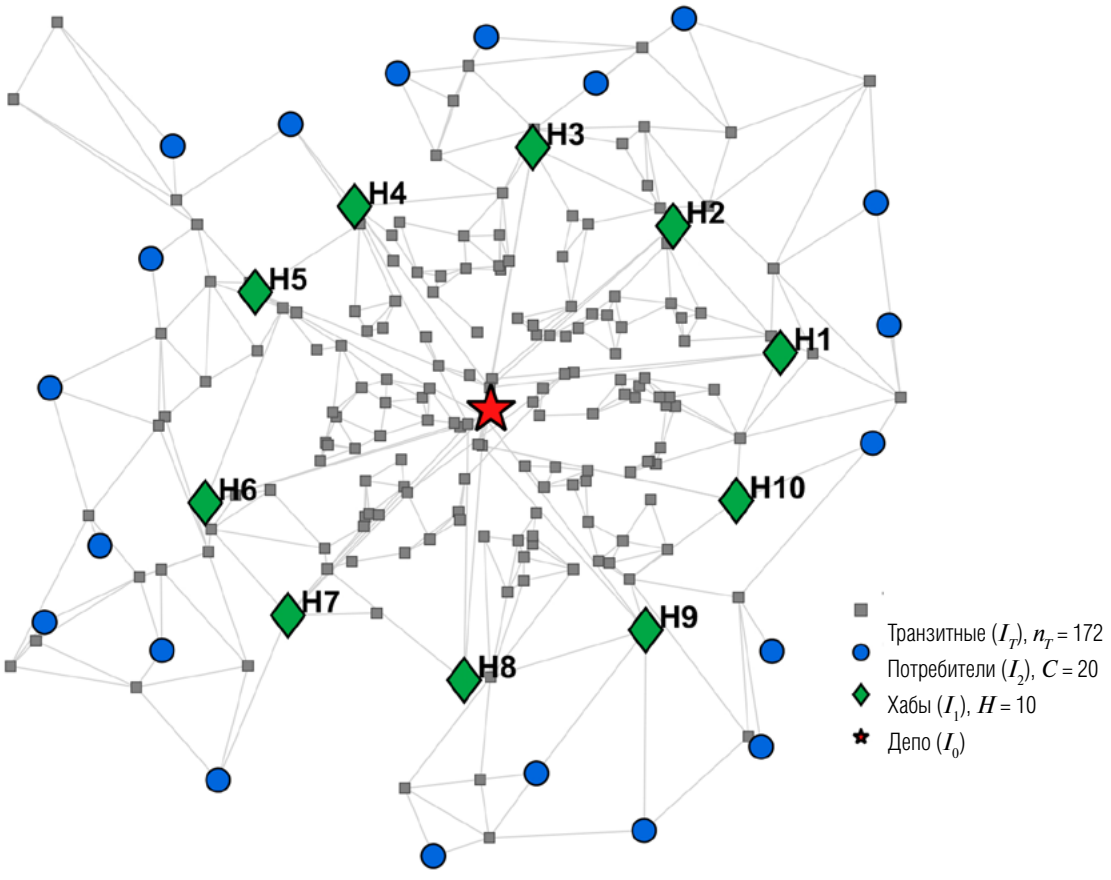


Рис. 1. Транспортный граф для двухэшелонной задачи.
Визуализация распределения депо, хабов, потребителей, транзитных пунктов и их смежность.

Таблица 4.

Сравнение наилучшей, наихудшей и выбранной по умолчанию конфигураций гиперпараметров 2E-ACO по результатам анализа чувствительности на базовом сценарии

Конфигурация	α	β	ρ	q_0	F_{mean}	Δ до лучшей, %
наилучшая	0,5	6	0,2	0,3	20040,31	–
по умолчанию	1,0	4	0,1	0,2	20440,56	+2,00
наихудшая	2,0	2	0,3	0	21944,37	+9,50

Примечание: $C = 50$, $H = 10$, 50 запусков на комбинацию.

этом 68,3% точек сетки дают целевую функцию в пределах 5% от наилучшей. В остальных экспериментах используется конфигурация по умолчанию: разрыв в 2% пренебрежимо мал по сравнению с дисперсией алгоритма, а наилучшая точка E4 получена непосредственно на базовом сценарии и не гарантирует оптимальности на других масштабах.

7.7. Абляционное исследование компонентов алгоритма (эксперимент E5)

Эксперимент E5 оценивает вклад каждого компонента алгоритма через отключение. Исследованы восемь конфигураций: (a) полный алгоритм (a_full), (b) только τ_1, (c) только τ_2, (d) двойной NN без феромонов, (e) без 2-opt, (f) без MMAS, (g) без элитной стратегии и (h) случайный NN; 100 запусков на конфигурацию. Критерий знаковых рангов Вилкоксона подтверждает значимое ухудшение для шести компонентов из семи (*табл.* 5). Вклад 2-opt на базовом сценарии не значим ($p > 0{,}05$), но при $H = 3$ становится значимым (раздел 7.11); 2-opt сохранен ввиду пренебрежимой вычислительной стоимости.

Наилучшее решение 2E-ACO для базового сценария показано на *рисунке 2*: сплошные красные (темные) линии – маршрут первого эшелона, пунктирные синие (серые) линии – дуги второго эшелона. Второй эшелон группирует потребителей вокруг ближайших хабов, а первый эшелон минимизирует суммарное расстояние с учетом коэффициента загрузки; транзитные вершины активно используются обоими эшелонами.

Таблица 5.

Результаты абляционного исследования компонентов 2E-ACO на базовом сценарии (100 запусков на конфигурацию)

Конфигурация	F_{mean}	Δ *vs* full, %
a_full	20440,56	–
b_only_τ_1	20890,27	+2,20
c_only_τ_2	20613,81	+0,85
d_double_NN	20975,80	+2,62
e_no_2opt	20453,89	+0,07
f_no_MMAS	21228,54	+3,86
g_no_elite	20631,13	+0,93
h_random (NN)	22181,55	+8,52

7.8. Влияние коэффициента нелинейности на решение (эксперимент E11)

На базовом сценарии $C = 50$ / $H = 10$ / $n_T = 172$ выполнено 50 запусков для каждого из шести значений $\lambda \in \{0; 0{,}1; 0{,}2; 0{,}3; 0{,}45; 0{,}6\}$ (*табл. 6*). При $\lambda = 0$ задача сводится к линейной постановке [1]; при $\lambda = 0{,}6$ средняя целевая функция возрастает на 56,2%, рост монотонен на всех запусках, критерий Вилкоксона «$F(0{,}6) > F(0)$» дает $p = 8{,}88 \cdot 10^{-16}$. Квадратичный штраф за перегрузку меняет оптимальную структуру маршрутов, а не просто перенормирует линейное решение.

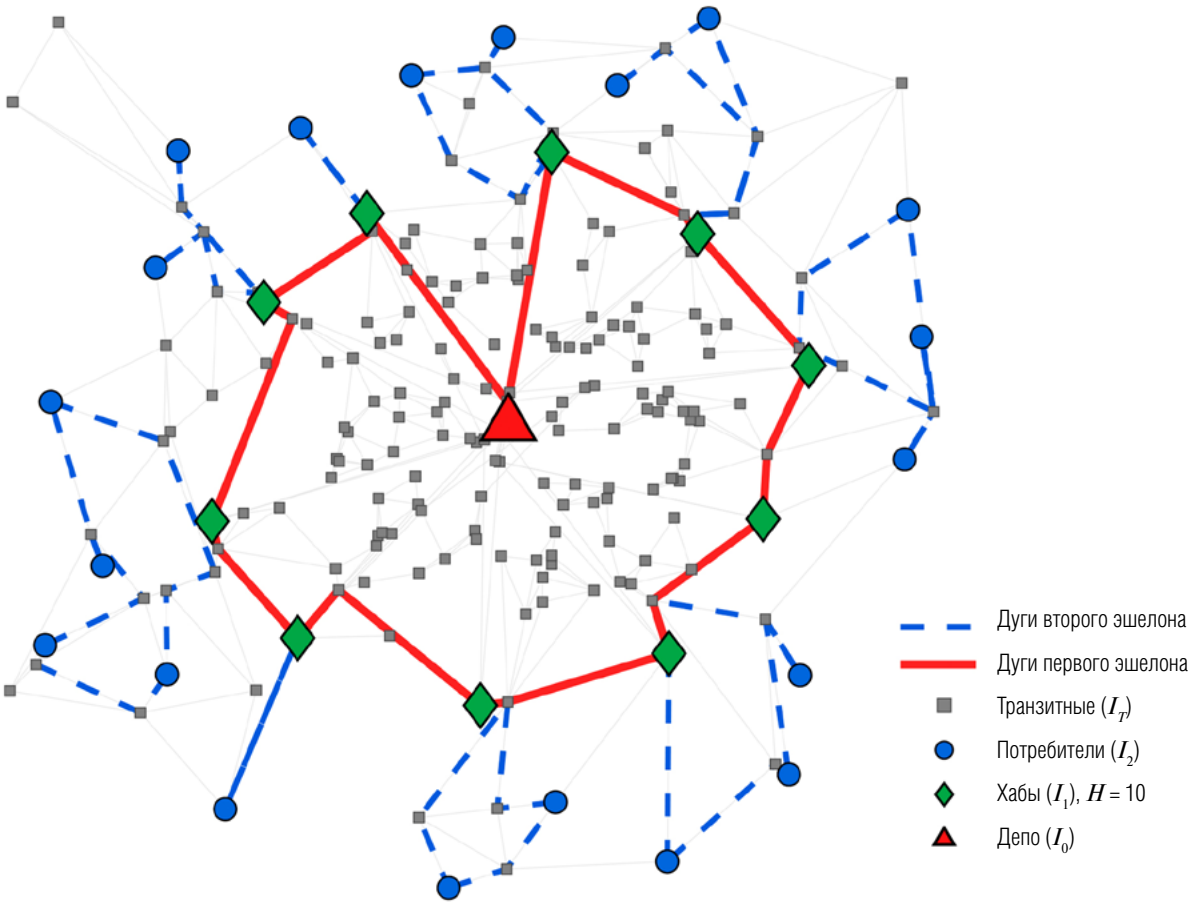


Рис. 2. Визуализация графа решения поставленной задачи.

Таблица 6.

Зависимость средней целевой функции от коэффициента нелинейности λ на базовом сценарии (50 запусков на точку)

λ	F_{mean}	Δ vs λ = 0, %
0	14202,91	–
0,10	16424,32	+15,64
0,20	18581,54	+30,83
0,30	20440,56	+43,92
0,45	22089,70	+55,53
0,60	22181,55	+56,18

На 20 потребителях алгоритм распределяет спрос по восьми транспортным средствам со средней загрузкой ~74% и максимальной не более 95%; при $\lambda = 0{,}6$ спрос перераспределяется на дополнительные транспортные средства, что позволяет избежать квадратичного штрафа.

7.9. Валидация на реальном графе Приморского края (эксперимент E7)

Эксперимент E7 переносит алгоритм на реальный транспортный граф Приморского края (*рис. 1*). На 30 запусках 2E-ACO дает $F = 5613{,}80$, $\sigma(F) = 38{,}40$ (относительное СКО $\sigma(F)/F_{mean} = 0{,}68\%$); это на 7,08% лучше NN ($F = 6041{,}25$), причем 2E-ACO лучше во всех 30 запусках. Низкая дисперсия объясняется ограниченностью множества допустимых маршрутов фиксированной топологией сети.

7.10. Скорость сходимости алгоритма (эксперимент E10)

Эксперимент E10 измеряет число итераций до наилучшего решения ($n_{\text{iter}\to\text{best}}$) на 50 запусках. Медиана $n_{\text{iter}\to\text{best}}$ равна 95, среднее – 94,5, СКО – 64,3. При $n_{\text{iter}} = 200$ алгоритм достигает наилучшего решения в среднем на 47% бюджета итераций, после чего 2-opt выводит решение на плато; медианный показатель определил периодичность 2-opt (каждые 50 итераций). Характер сходимости соответствует быстрому убыванию на первых ~15 итерациях с последующим ступенчатым уточнением; в агрегированной структуре стоимости второй эшелон доминирует (~60% суммарной стоимости).

7.11. Чувствительность к числу хабов и транзитных вершин (эксперименты E8 и E9)

Эксперимент E8 анализирует эффект числа хабов $H \in \{3, 5, 8, 10, 15\}$ при фиксированных $C = 50$, $n_T = 172$ (100 запусков на точку). Минимум $F = 19227{,}50$ достигается при $H = 3$; с ростом H целевая функция монотонно возрастает до $F = 20479{,}26$ при $H = 15$. Эффект объясняется удлинением магистрального маршрута F_1 при слабом влиянии на распределительный эшелон.

Эксперимент E9 оценивает плотность транзитных вершин $n_T \in \{50, 100, 172, 300\}$ (100 запусков на точку): среднее целевой функции монотонно растет от $F = 19708{,}23$ при $n_T = 50$ до $F = 20783{,}30$ при $n_T = 300$. Рост не превышает 5,5%, что подтверждает устойчивость алгоритма к структурному шуму.

Заключение

В работе рассмотрена двухэшелонная задача транспортной логистики лесопромышленного комплекса с нелинейной функцией стоимости и реальной транспортной сетью Приморского края. Центральный содержательный результат состоит в том, что нелинейная постановка качественно отличается от линейной: введение квадратичной зависимости стоимости от загрузки изменяет оптимальную структуру маршрутов, а не просто масштабирует линейное решение. Это подтверждено как формально (переход к линейной модели [1] при $\lambda = 0$), так и экспериментально (монотонный рост F на 56,2% при изменении $\lambda \in [0; 0{,}6]$). Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Сформулирована математическая модель, в которой стоимость прохождения дуги зависит от загрузки транспортного средства через коэффициент

$$\left(1+\lambda\cdot\left(\frac{l_{ij}^{(v)}}{Q}\right)^2\right).$$

Модель параметризована: при $\lambda = 0$ она редуцируется к линейной постановке [1], что обеспечивает совместимость с предыдущими результатами.

2. Разработан алгоритм 2E-ACO с двумя независимыми феромонными матрицами τ_2 и τ_1, правилом ACS с параметром q_0, схемой MMAS и элитной стратегией. Абляционное исследование на семи компонентах подтверждает значимость шести из них; наибольший вклад вносят схема MMAS (удаление ухудшает результат на 3,86%), феромонная матрица τ_2 второго эшелона (на 2,20%) и матрица τ_1 первого эшелона (на 0,85%).

3. Алгоритм превосходит жадную эвристику NN в 49/50 запусках базового сценария (улучшение 7,73%, $p = 5{,}55 \cdot 10^{-10}$) и последовательную MILP-декомпозицию в 76/80 случаях ($p = 9{,}82 \cdot 10^{-15}$). На реальном графе Приморского края (203 вершины, 30 запусков) достигнуто $F = 5613{,}80$ при относительном стандартном отклонении 0,68% и улучшении 7,08% относительно NN. Строгая оценка разрыва до оптимума получена лишь при числе потребителей до 25, что является ограничением текущего экспериментального протокола.

4. Зависимость времени счета от числа потребителей описывается сублинейным степенным законом $T \approx 0{,}163 \cdot C^{0{,}841}$. Вариация коэффициента нелинейности в диапазоне $\lambda \in [0; 0{,}6]$ изменяет среднюю целевую функцию на 56,2% ($p = 8{,}88 \cdot 10^{-16}$), что количественно подтверждает нетривиальность нелинейной постановки. Практическое значение работы – применимость предложенного метаэвристического подхода к планированию вывоза лесопродукции на реальной дорожной инфраструктуре с нелинейной функцией стоимости при времени счета порядка единиц секунд.

Ограничения исследования: (1) функция стоимости учитывает только нелинейность по загрузке, эффекты времени суток и покрытия не отражены; значение λ выбрано по аналогии с литературой

и не калибровано на данных лесоперевозок; (2) на реальном графе число потребителей C ограничено 20; (3) сравнение с точной MILP-декомпозицией проведено только для $C \leqslant 25$; при $C > 25$ оптимальная нижняя граница неизвестна; (4) не рассмотрены альтернативные метаэвристики (генетические алгоритмы, имитация отжига), что оставляет открытым вопрос о сравнительной эффективности 2E-ACO.

Перспективные направления дальнейших исследований включают: (1) расширение модели на случай стохастического спроса и стохастического времени в пути; (2) учет временных окон обслуживания потребителей и включение штрафов за опоздания; (3) калибровку коэффициента нелинейности по реальным данным о расходе топлива лесовозной техники; (4) обобщение модели на случай гетерогенного автопарка с транспортными средствами разной вместимости; (5) сравнение с альтернативными метаэвристиками (генетические алгоритмы, алгоритм роя частиц) на стандартизированных задачах. ■

Литература

1. Рогулин Р. С. Двухэшелонная модель транспортной системы и муравьиный алгоритм: анализ масштабируемости вычислительных решений // Информатика и автоматизация. 2026. Т. 25. № 2. С. 478–516. https://doi.org/10.15622/ia.25.2.8
2. Injac Z., Drašković D. Classification of vehicle routing problem // Journal of Traffic and Transport Theory and Practice. 2024. Vol. 9. No. 1. P. 36–41. https://doi.org/10.7251/JTTTP2401036I
3. Halima U., Obafemi O. Enhancing transportation efficiency in Sokoto state metropolis through vehicle routing problem optimization // International Journal of Science for Global Sustainability. 2024. Vol. 10. No. 3. P. 160–166. https://doi.org/10.57233/ijsgs.v10i3.716
4. Alba E., Dorronsoro B. Computing nine new best-so-far solutions for Capacitated VRP with a cellular Genetic algorithm // Information Processing Letters. 2006. Vol. 98. No. 6. P. 225–230. https://doi.org/10.1016/j.ipl.2006.02.006
5. Cavaliere F., Accorsi R., Laganà D., Musmanno R., Vigo D. An efficient heuristic for very large-scale vehicle routing problems with simultaneous pickup and delivery // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2024. Vol. 186. Art. 103537. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103550
6. Shehab W. A.-A., Muhsan H., Alrikabi B., Abdul-Razaq A.-A., Nasser H. K., Hameed A. S. Comparative analysis of new solutions for the capacitated vehicle routing problem against CVRPLIB benchmark // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. 2024. Vol. 10. No. 4. P. 1450–1457. https://doi.org/10.22399/ijcesen.626
7. Blum C. Ant colony optimization: a bibliometric review // Physics of Life Reviews. 2024. Vol. 51. P. 87–95. https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.09.014
8. Tang K., Wei X.-F., Jiang Y.-H., Chen Z.-W., Yang L. An adaptive ant colony optimization for solving large-scale traveling salesman problem // Mathematics. 2023. Vol. 11. No. 21. Art. 4439. https://doi.org/10.3390/math11214439
9. Chen G., Gao J., Chen D. Research on vehicle routing problem with time windows based on improved genetic algorithm and ant colony algorithm // Electronics. 2025. Vol. 14. No. 4. Art. 647. https://doi.org/10.3390/electronics14040647
10. Ahmed Z. H., Hameed A. S., Mutar M. L., Haron H. An enhanced ant colony system algorithm based on subpaths for solving the capacitated vehicle routing problem // Symmetry. 2023. Vol. 15. No. 11. Art. 2020. https://doi.org/10.3390/sym15112020
11. Bai X., Li D., Xu X. A review of improved methods for ant colony optimization in path planning // Journal of Ship Research. 2024. Vol. 68. No. 2. P. 77–92. https://doi.org/10.5957/JOSR.10230029
12. Starzec M., Starzec G., Rutkowski L., Kisiel-Dorohinicki M., Byrski A. Ant colony optimization using two-dimensional pheromone for single-objective transport problems // Journal of Computational Science. 2024. Vol. 79. Art. 102308. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102308
13. Ivković N., Kudelić R., Golub M. Adjustable pheromone reinforcement strategies for problems with efficient heuristic information // Algorithms. 2023. Vol. 16. No. 5. Art. 251. https://doi.org/10.3390/a16050251
14. Application of the ant colony optimization metaheuristic in transport / L.V. F. de Mello Filho [et al.] // Modelling. 2025. Vol. 6. No. 3. Art. 62. https://doi.org/10.3390/modelling6030062
15. Li T., Deng S., Lu C., Wang Y., Liao H. Optimization of green vehicle paths considering the impact of carbon emissions: A case study of municipal solid waste collection and transportation // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 22. Art. 16128. https://doi.org/10.3390/su152216128
16. Sun Y., Zhang C., Sun G. An interval fuzzy programming approach to solve a green intermodal routing problem for timber transportation under uncertain information // Forests. 2024. Vol. 15. No. 11. Art. 2003. https://doi.org/10.3390/f15112003
17. Jamaluddin J., Kamarudin N., Ismail M. H., Ahmad S. A. Optimizing timber transportation planning for timber harvesting using bees algorithm in Malaysia // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 340. Art. 117977. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117977
18. Nunes L. J. R. The role of artificial intelligence (AI) in the future of forestry sector logistics // Future Transportation. 2025. Vol. 5. No. 2. Art. 63. https://doi.org/10.3390/futuretransp5020063

19. Palander T., Tokola T., Borz S.A., Rauch P. Forest supply chains during digitalization: current implementations and prospects in near future // Current Forestry Reports. 2024. Vol. 10. P. 223–238. https://doi.org/10.1007/s40725-024-00218-4

20. Helo P., Rouzafzoon J. An agent-based simulation and logistics optimization model for managing uncertain demand in forest supply chains // Supply Chain Analytics. 2023. Vol. 4. Art. 100042. https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100042

21. Bektaş T., Laporte G. The Pollution-Routing Problem // Transportation Research Part B: Methodological. 2011. Vol. 45. No. 8. P. 1232–1250. https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004

22. Demir E., Bektaş T., Laporte G. A review of recent research on green road freight transportation // European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 237. No. 3. P. 775–793. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033

23. Рогулин Р. С., Плешанов Д. Е., Нечаев П. В. Комплексная оптимизационная модель процессов производства и транспортировки продукции // Дискурс. 2018. Т. 4. No. 5. С. 66–73.

24. Рогулин Р. С. Управление ценовой политикой лесопромышленного предприятия с учетом проблем формирования цепей поставок сырья и расчета объемов производства // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. No. 4. С. 98–111. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.4.98.111

25. Рогулин Р. С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. No. 4. С. 41–56. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

26. Dorigo M., Gambardella L. M. Ant Colony System: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1997. Vol. 1. No. 1. P. 53–66. https://doi.org/10.1109/4235.585892

27. Stützle T., Hoos H. H. MAX–MIN ant system // Future Generation Computer Systems. 2000. Vol. 16. No. 8. P. 889–914. https://doi.org/10.1016/S0167-739X(00)00043-1

Об авторе

Родион Сергеевич Рогулин

кандидат экономических наук;

доцент, кафедра технологий управления, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Россия, 173003, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41;

Email: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

A two-echelon routing problem in forest-industry logistics with a nonlinear cost function: A modified ant colony algorithm on a transport graph with transit vertices

Rodion Sergeevich Rogulin

Email: rafassiaofusa@mail.ru

Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

Abstract

This paper studies the problem of planning forest-product transportation from a single shipping point through a network of intermediate transfer hubs to final consumers over a real road network. A key feature of the formulation is that the unit cost per kilometer depends nonlinearly on vehicle load: partially loaded trucks cost the industry more per unit of goods delivered. The aim of the study is to propose a mathematical model of this two-level logistics problem and an algorithm to solve it that is suitable for transportation networks of realistic size. A modified version of the ant colony optimization algorithm – a bio-inspired optimization method – has been developed; it jointly optimizes the routes of both delivery levels. The proposed algorithm is compared with three reference approaches: an exact method based on mixed integer linear programming, its lower bound, and a simple nearest-neighbor greedy heuristic. Experiments were carried out on a training scenario with fifty consumers and on the real road network of the Primorsky Krai region of Russia, containing 203 nodes. The proposed algorithm outperformed the greedy heuristic in 49 out of 50 runs with an average improvement of about 7.7%, and outperformed the exact method in 76 out of 80 cases. On the real road network the improvement over the greedy heuristic was about 7%, and the algorithm results were stable: the spread between runs did not exceed 1%. The practical value of the work is the applicability of the model and algorithm to transportation planning in the forest-industry sector and in other sectors with extensive delivery networks.

Keywords: two-echelon routing problem, nonlinear cost function, ant colony algorithm, forest-industry transportation logistics, transportation planning, transport graph with intermediate nodes

Citation: Rogulin, R. S. (2026). A two-echelon routing problem in forest-industry logistics with a nonlinear cost function: A modified ant colony algorithm on a transport graph with transit vertices. *Business Informatics*, *20*(3), 114–133. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.3.114.133

References

1. Rogulin, R. S. (2026). Two-echelon transport-system model and an ant colony algorithm: scalability analysis of computational solutions. *Informatics and Automation, 25*(2), 478–516 (in Russian). https://doi.org/10.15622/ia.25.2.8

2. Injac, Z., & Drašković, D. (2024). Classification of vehicle routing problem. *Journal of Traffic and Transport Theory and Practice, 9*(1), 36–41. https://doi.org/10.7251/JTTTP2401036I

3. Usman, H., & Obafemi, O. R. (2024). Enhancing transportation efficiency in Sokoto state metropolis through vehicle routing problem optimization. *International Journal of Science for Global Sustainability, 10*(3), 160–166. https://doi.org/10.57233/ijsgs.v10i3.716

4. Alba, E., & Dorronsoro, B. (2006). Computing nine new best-so-far solutions for capacitated VRP with a cellular genetic algorithm. *Information Processing Letters, 98*(6), 225–230. https://doi.org/10.1016/j.ipl.2006.02.006

5. Cavaliere, F., Accorsi, L., Laganà, D., Musmanno, R., & Vigo, D. (2024). An efficient heuristic for very large-scale vehicle routing problems with simultaneous pickup and delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 186*, 103550. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103550

6. Shehab, W. A.-A., Muhsan, H. B., Alrikabi, B., Abdul-Razaq, A.-A., Nasser, H. K., & Hameed, A. S. (2024). Comparative analysis of new solutions for the capacitated vehicle routing problem against CVRPLIB benchmark. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 10*(4), 1450–1457. https://doi.org/10.22399/ijcesen.626

7. Blum, C. (2024). Ant colony optimization: A bibliometric review. *Physics of Life Reviews, 51*, 87–95. https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.09.014

8. Tang, K., Wei, X. F., Jiang, Y. H., Chen, Z. W., & Yang, L. (2023). An adaptive ant colony optimization for solving large-scale traveling salesman problem. *Mathematics, 11*(21), 4439. https://doi.org/10.3390/math11214439

9. Chen, G., Gao, J., & Chen, D. (2025). Research on vehicle routing problem with time windows based on improved genetic algorithm and ant colony algorithm. *Electronics, 14*(4), 647. https://doi.org/10.3390/electronics14040647

10. Ahmed, Z. H., Hameed, A. S., Mutar, M. L., & Haron, H. (2023). An enhanced ant colony system algorithm based on subpaths for solving the capacitated vehicle routing problem. *Symmetry, 15*(11), 2020. https://doi.org/10.3390/sym15112020

11. Bai, X., Liu, D., & Xu, X. (2024). A review of improved methods for ant colony optimization in path planning. *Journal of Ship Research, 68*(2), 77–92. https://doi.org/10.5957/JOSR.10230029

12. Starzec, G., Starzec, M., Rutkowski, L., Kisiel-Dorohinicki, M., & Byrski, A. (2024). Ant colony optimization using two-dimensional pheromone for single-objective transport problems. *Journal of Computational Science, 79*, 102308. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102308

13. Ivković, N., Kudelić, R., & Golub, M. (2023). Adjustable pheromone reinforcement strategies for problems with efficient heuristic information. *Algorithms, 16*(5), 251. https://doi.org/10.3390/a16050251

14. de Mello Filho, L. V. F., de Sousa, F. P. L., de Godoi, G., Emiliano, W. M., Canteras, F. B., Molina Júnior, V. E., Bertini Junior, J. R., & Meyer, Y. A. (2025). Application of the ant colony optimization metaheuristic in transport engineering: A case study on vehicle routing and highway service stations. *Modelling, 6*(3), 62. https://doi.org/10.3390/modelling6030062

15. Li, T., Deng, S., Lu, C., Wang, Y., & Liao, H. (2023). Optimization of green vehicle paths considering the impact of carbon emissions: A case study of municipal solid waste collection and transportation. *Sustainability, 15*(22), Article 16128. https://doi.org/10.3390/su152216128

16. Sun, Y., Zhang, C., & Sun, G. (2024). An interval fuzzy programming approach to solve a green intermodal routing problem for timber transportation under uncertain information. *Forests, 15*(11), 2003. https://doi.org/10.3390/f15112003

17. Jamaluddin, J., Kamarudin, N., Ismail, M. H., & Ahmad, S. A. (2023). Optimizing timber transportation planning for timber harvesting using bees algorithm in Malaysia. *Journal of Environmental Management*, *340*, 117977. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117977

18. Nunes, L. J. R. (2025). The role of artificial intelligence (AI) in the future of forestry sector logistics. *Future Transportation, 5*(2), 63. https://doi.org/10.3390/futuretransp5020063

19. Palander, T., Tokola, T., Borz, S. A., & Rauch, P. (2024). Forest supply chains during digitalization: Current implementations and prospects in near future. *Current Forestry Reports, 10*(3), 223–238. https://doi.org/10.1007/s40725-024-00218-4

20. Helo, P., & Rouzafzoon, J. (2023). An agent-based simulation and logistics optimization model for managing uncertain demand in forest supply chains. *Supply Chain Analytics, 4*, 100042. https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100042

21. Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological, 45*(8), 1232–1250. https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004

22. Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research, 237*(3), 775–793. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033

23. Rogulin, R. S., Pleshanov, D. E., & Nechaev, P. V. (2018). A complex optimization model of production and transportation processes. *Discourse, 4*(5), 66–73 (in Russian). https://discourse.etu.ru/assets/files/r.-s.-rogulin-p.-v.-nechaev-d.-e.-pleshanov.pdf

24. Rogulin, R. S. (2024). Management of pricing policy of a timber enterprise considering the problems of formation of raw material supply chains and determining production volumes. *Business Informatics, 18*(4), 98–111. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.4.98.111

25. Rogulin, R. S. (2023). Mathematical model of the formation of supply chains of raw materials from a commodity exchange under conditions of uncertainty. *Business Informatics, 17*(4), 41–56. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

26. Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1*(1), 53–66. https://doi.org/10.1109/4235.585892

27. Stützle, T., & Hoos, H. H. (2000). MAX–MIN ant system. *Future Generation Computer Systems, 16*(8), 889–914. https://doi.org/10.1016/S0167-739X(00)00043-1

About the author

Rodion Sergeevich Rogulin

Candidate of Sciences (Economics);

Associate Professor, Department of Management Technologies, Yaroslav the Wise Novgorod State University, 41 Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Veliky Novgorod 173003, Russia;

Email: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429