

# БИЗНЕС- ИНФОРМАТИКА

Научный журнал НИУ ВШЭ

## СОДЕРЖАНИЕ

*А.Ю. Варнухов, Д.М. Назаров*

Мэтчинг товаров на маркетплейсах:  
мультимодальная модель на основе архитектуры  
трансформера ..... 7

*А.И. Денисова, Д.А. Созаева, К.В. Гончар*

Разработка рекомендательных систем  
для повышения эффективности регулируемых  
закупок в электроэнергетике ..... 25

*Ф.В. Краснов, Ф.И. Курушин*

Аватар-модель покупателя на сетях  
Колмогорова-Арнольда ..... 41

*П.А. Михненко*

Математическая модель и интеллектуальная система  
анализа интенсивности изменений мегапроектов:  
роль временных центров управления ..... 54

*Ю.С. Эзрох, А.В. Снытников,  
Е.Ю. Скоробогатых*

Параллельная реализация симплекс-метода  
в матричной форме средствами библиотеки  
RuTorch для задач экономики и менеджмента ..... 77

*В.И. Будзко, В.И. Меденников*

Экосистемный подход к стратегическому управлению  
на примере сельского хозяйства ..... 89



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

Дизайн обложки выполнен  
с использованием контента (изображения),  
генерированного Пользователем  
О.А. Богданович (по поручению НИУ ВШЭ),  
при помощи Сервиса Kandinsky 3.0 (fusionbrain.ai)

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](mailto: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

«**Б**изнес-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.

## 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

**Баракнин Владимир Борисович**

Федеральный исследовательский центр информационных  
и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

**Беккер Йорг**

Университет Мюнстера, Мюнстер, Германия

**Вестнер Маркус**

Технический университет прикладных наук,  
Регенсбург, 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)

# BUSINESS INFORMATICS

HSE Scientific Journal

## CONTENTS

*A.Yu. Varnukhov, D.M. Nazarov*

Product matching in digital marketplaces:  
Multimodal model based on the transformer  
architecture ..... 7

*A.I. Denisova, D.A. Sozaeva, K.V. Gonchar*

Development of recommendation systems to improve  
the efficiency of regulated procurement in the electric  
power industry. .... 25

*F.V. Krasnov, F.I. Kurushin*

A customer avatar model based  
on Kolmogorov–Arnold networks.....41

*P.A. Mikhnenko*

Mathematical model and intelligent system  
for analyzing the intensity of megaproject changes:  
the role of temporary change management hubs ..... 54

*Yu.S. Ezrokh, A.V. Snytnikov,  
E.Yu. Skorobogatykh*

Parallel implementation of the simplex method  
in matrix form using the PyTorch library for economics  
and management problems..... 77

*V.I. Budzko, V.I. Medennikov*

Ecosystem approach to strategic management  
on the example of agriculture..... 89

Vol. 19 No. 2 – 2025



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**  
using the Kandinsky 3.0 Service  
(fusionbrain.ai)

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](mailto: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

**B**usiness 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.

# 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

**Markus Westner**

Technical University for Applied Sciences (OTH Regensburg), Regensburg, Germany

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.7.24

# Мэтчинг товаров на маркетплейсах: мультимодальная модель на основе архитектуры трансформера

**А.Ю. Варнухов**

E-mail: varnuhov\_ayu@usue.ru

**Д.М. Назаров** 

E-mail: slup2005@mail.ru

Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

## Аннотация

В работе рассматривается проблема интеллектуального мэтчинга товаров на маркетплейсах в рамках которого необходимо выполнять оценку схожести различных записей, которые описывают продукты, но могут отличаться по формату, содержанию или объёму мультимодальных данных. Тематика научного поиска находится на пересечении методов решения задач entity resolution (ER) – сопоставления записей и мультимодального анализа данных. Она является крайне актуальной в условиях быстрорастущей платформенной экономики при кратно увеличивающемся объеме рынка электронной коммерции. Основная цель исследования – разработать и протестировать мультимодальную интеллектуальную модель на базе архитектуры трансформера для повышения точности и робастности мэтчинга товаров на маркетплейсах. Разработанная авторами модель, интегрирующая текстовые, визуальные и табличные признаки, позволит эффективнее идентифицировать схожие товары, проводить поиск конкурентных предложений, обнаруживать дубликаты, а также выполнять кластеризацию и сегментацию товаров. Предложенный подход опирается на механизм внимания (self-attention), позволяющий моделировать контекстуально-семантические взаимосвязи в данных различной природы. Для извлечения векторного представления текстовых описаний используются языковые модели, в частности архитектура Sentence-BERT, для графической компоненты Vision Transformer, а табличные данные обрабатываются с применением специализированных механизмов обучения на структурированных данных TabTransformer. Проведенный эксперимент продемонстрировал, что разработанная мультимодальная модель эффективно справляется с задачей мэтчинга в условиях значительной вариативности товарных позиций и неоднородности данных. Кроме того, полученные данные позволяют утверждать, что модель может быть успешно адаптирована для использования в рам-

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

ках других категорий товаров. Полученные результаты подтверждают эффективность и целесообразность использования мультимодального подхода для реализации мэтчинга товаров на маркетплейсах, позволяя участникам рынка электронной коммерции существенно улучшить качество управления товарными запасами, повысить эффективность ценообразования и укрепить свои конкурентные преимущества.

**Ключевые слова:** маркетплейсы, контекстно-семантическая идентификация, поиск конкурентных предложений, мэтчинг, машинное обучение, глубокое обучение, архитектура трансформера, интеллектуальный анализ данных

**Цитирование:** Варнухов А.Ю., Назаров Д.М. Мэтчинг товаров на маркетплейсах: мультимодальная модель на основе архитектуры трансформера // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 2. С. 7–24. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.7.24

### Введение

Стремительное развитие платформенной экономики в последние десятилетия вызвано появлением и повсеместным распространением цифровых платформ, которые выступают в качестве медиатора между покупателями и продавцами. Маркетплейсы, как цифровые платформы, позволяют продавцам получать доступ к широкой аудитории, а покупателям – к удобным сервисам поиска и сравнения товарных предложений от различных продавцов. При этом управление данными о товарах и их сопоставление (мэтчинг) становятся сложной научной проблемой, от решения которой напрямую зависят прямые и косвенные показатели экономической деятельности всех участников платформ электронной коммерции. К прямым можно отнести показатели, влияющие на выбор модели ценообразования, а к косвенным – эффективность продвижения продукции, точность рекомендаций и удовлетворённость потребителей. При этом совершенно очевидно, что прямые и косвенные показатели связаны каузально. Актуальность темы исследования обусловлена тем, что с ростом объёмов рынков электронной коммерции и расширением номенклатурных позиций товаров на цифровых платформах возникает потребность в использовании более продвинутых математических и инструментальных методов в экономике, способных обеспечить автоматизированный, а скорее даже интеллектуальный и надёжный мэтчинг товаров в больших потоках разнородной информации на маркетплейсах.

С научной точки зрения проблема мэтчинга товаров (идентификации записей о товарах) близка к задачам entity resolution (далее ER) – сопоставления сущностей с учетом возможности их дублирования, однако в контексте маркетплейсов, расширяется за счёт использования мультимодальных данных при описании товаров. Действительно, описания товаров на маркетплейсах обычно включают не только текстовую информацию, но также изображения и их характеристики, выраженные в табличной форме.

Ниже приводится краткий обзор литературы, разбитый на два логических блока – персонализация с учетом специфики e-commerce и ER в контексте алгоритмических подходов к мэтчингу.

Ряд работ, которые легли в основу формирования научной базы данного исследования, фокусируются на изучении поведения пользователей, создании рекомендательных систем и оценке особенностей товарных категорий в электронной коммерции (Н. Angermann, М. Mao, F. T. Abdul Hussien, A. Fletcher, P. Ristoski, M. Cheung и др.). Большинство ученых указывают на важность использования интегрированного подхода при обработке текстовых описаний, изображений и метаданных для повышения точности рекомендаций и выявления скрытых взаимосвязей в больших массивах данных (big data). Анализ этих исследований в контексте мэтчинга показывает необходимость применения технологий обработки мультимодальных данных, чтобы в конечном итоге корректно сопоставлять не только названия и характеристики, но и визуальные атрибуты товаров.

Другим направлением исследований в рамках тематики статьи являются классические задачи поиска дубликатов записей, сопоставления сущностей и разработки алгоритмов для точного объединения данных (W.W. Cohen, S.S. Aanen, J. Devlin, A.K. Elmagarmid, N. Reimers, J. Wang, H. Köpcke и др.). В работах этих авторов рассматриваются различные метрики сходства, включая расстояние Левенштейна и аналоги, языковые модели и методы обучения по прецедентам, позволяющие конструировать паттерны для выявления потенциальных совпадений. Кроме того, нередко поднимается вопрос о масштабируемости решений – от разработки пакетных программных продуктов до высоконагруженных систем, обрабатывающих динамические потоки данных в режиме реального времени. Стремительное развитие архитектур глубокого обучения, в том числе на основе трансформеров, обуславливает переход от автоматизированного поиска признаков (далее features) к интеллектуальным методам, выявляющим сложные паттерны. Такие подходы особенно актуальны для маркетплейсов, где критически важными факторами являются скорость и надёжность обработки больших массивов данных, учитывающих их различные экономические характеристики, в том числе и динамику цен.

Таким образом, существующие исследования подтверждают важность применения продвинутых экономико-математических методов при разработке систем мэтчинга товаров на маркетплейсах на основе обработки мультимодальных данных. Однако, ряд вопросов в рамках проведенного обзора литературы остаётся открытыми: как оптимально объединить признаки, какие подходы наиболее эффективны для анализа мультимодальных данных и каким образом адаптировать разрабатываемые модели к появлению новых товаров и источников информации. В рамках данного исследования предлагается мультимодальная модель, основанная на архитектуре трансформера, которая способна обрабатывать данные из различных источников и позволяет последовательно и эффективно интегрировать разные модальности благодаря механизму внимания и многоуровневым представлениям для более точного сопоставления товарных позиций. Предложенный подход вносит вклад в область математических и инструментальных методов в экономике, направленных на создание устойчивых систем анализа больших данных, а также поддерживает масштабируемость и учитывает высокую динамичность платформ электронной коммерции.

Научный вклад работы состоит в создании и валидации подхода, который позволяет интегрировать одновременно текстовые, визуальные и табличные данные в единой модульной системе на основе трансформер-архитектуры.

Цель исследования – разработать и апробировать такую модель, чтобы обеспечить высокую точность и робастность мэтчинга товаров на больших выборках товарных позиций, характерных для современных маркетплейсов.

Статья состоит из четырех разделов. Первый раздел посвящен изучению потенциала и возможностей применения мэтчинга товаров на маркетплейсах. Во втором разделе проводится анализ существующих подходов и делается постановка задачи мэтчинга на маркетплейсах. В третьем разделе разработана мультимодальная модель мэтчинга товаров на маркетплейсах (МММР). В четвертом разделе исследования обсуждается применение модели для оценки схожести товаров на маркетплейсе Wildberries.

### **1. Потенциал и возможности применения мэтчинга товаров на маркетплейсах**

Под мэтчингом товаров (product matching) понимается процесс сопоставления (связывания) товаров, который позволяет определять какие позиции являются одинаковыми или аналогичными по своей сути, чтобы гарантировать, что один и тот же продукт будет правильно распознан даже если он появится под разными названиями, описаниями или идентификаторами. Так, например, при наличии эквивалентных моделей смартфона от одного бренда, представленного в разных магазинах на маркетплейсах, его характеристики, фото и даже формулировка наименования могут существенно отличаться.

Мэтчинг товаров является фундаментальным компонентом, который активно применяется в различных современных цифровых экосистемах, включая маркетплейсы, платформы объявлений, сервисы электронной коммерции и другие онлайн-площадки. С точки зрения покупателей, мэтчинг товаров позволяет существенно повысить удобство совершения покупок поскольку обеспечивает возможность простого и быстрого поиска аналогичных товарных предложений от различных продавцов [1]. Например, внедрив систему подбора товаров, которая

объединит схожие предложения в единую и хорошо структурированную коллекцию однотипных объявлений можно избавить покупателей от необходимости перебирать многочисленные варианты в рамках одной товарной категории. Подобная система будет ограждать покупателей от просмотра дублирующих или вводящих в заблуждение предложений, которые превращают подбор товаров в запутанный и отнимающий продолжительное время процесс. Вместо этого покупатели получают возможность быстро сравнивать цены, отзывы и рейтинг продавцов, что, в конечном итоге, приведет к повышению релевантности поиска и общей удовлетворенности от совершения покупок, а также будет способствовать принятию более взвешенных и обоснованных решений. Кроме того, мэтчинг товаров может применяться для создания персонализированных рекомендаций на основе анализа поведения потребителей [2], их предпочтений и прошлых покупок с целью оказания помощи при выборе наиболее подходящих товаров, повышая вовлеченность пользователей и общую ценность платформы.

С точки зрения продавцов, мэтчинг товаров помогает анализировать конкурентные предложения [3], позволяя корректировать и выстраивать свои ценовые стратегии на основе рыночных тенденций в режиме реального времени [4]. Цифровые торговые площадки аккумулируют огромные объемы данных о товарах, однако без должной обработки и надлежащей структурной организации большая часть этой информации остается фрагментированной, противоречивой и сложной для эффективного анализа. Например, многие продавцы экспонируют один и тот же товар на платформах с некоторыми отличиями в названии, фотографиях, описании или характеристиках. Без применения мэтчинга товаров продавцам приходится вручную отслеживать и сравнить тысячи объявлений, что является весьма энергозатратным и затратным процессом, который чреват ошибками. Автоматизированная идентификация и увязка схожих товаров предоставляет возможность объединить разрозненную информацию в единое согласованное хранилище данных, которое будет являться ценным источником сведений для дальнейшего анализа и принятия решений на основе актуальной рыночной ситуации. Обладание таким источником сведений создает условия для применения моделей алгоритмического ценообразования, которые основаны на оценке рыночной ситуации поскольку позволяют проводить оперативный мониторинг цен конкурентов и

изменений рыночного спроса, открывая возможность для применения стратегий динамического ценообразования. Благодаря этому продавцы могут адаптировать свои предложения в режиме реального времени в соответствии с поведением потребителей и текущей рыночной ситуацией, гарантируя, что цены на товары остаются конкурентоспособными, привлекая покупателей без ущерба для своей маржинальности. Подобная гибкость позволяет выявлять зарождающиеся тренды, активно реагировать на сезонные колебания, рекламные активности и экономические изменения, что в конечном итоге будет способствовать долгосрочному и устойчивому развитию в условиях высококонкурентного рынка цифровых платформ. Также мэтчинг товаров играет важную роль в проведении рекламных и маркетинговых кампаний. Одним из основных преимуществ использования мэтчинга товаров в этом контексте является возможность оптимизировать расходы на рекламу. При правильной идентификации аналогичных товаров, предлагаемых другими продавцами, можно избежать излишней конкуренции, что позволит исключить напрасные расходы и перераспределить бюджет в более выгодные ниши. Помимо рекламных активностей расширяются возможности кросс-сейла. Аккуратно связывая взаимодополняющие, часто покупаемые или другие полезные товары друг с другом продавцы могут формировать привлекательные предложения.

Еще одним важным направлением применения алгоритмов мэтчинга является их роль в борьбе с мошенничеством и выявлении контрафактной продукции для оказания содействия операторам платформы в поддержании доверия, безопасности и целостности экосистем [5]. Вместе с быстрым развитием и ростом влияния площадок электронной коммерции на общественную жизнь все чаще возникают инциденты, связанные с мошенническими объявлениями, контрафактными и умышленно вводящими в заблуждение товарами, что указывает на серьезный вызов для отрасли. Подобные противоправные действия злоумышленников наносят ущерб не только конечным потребителям, но также подрывают общее доверие к цифровым площадкам и бизнесу законопослушных продавцов [6]. Необходимость обнаружения контрафакта особенно актуальна для многих товарных категорий, среди которых можно привести в пример: электронику, фармацевтику и косметику. В этих категориях контрафактные товары могут нести не только финансо-

вые риски, но также представлять непосредственную угрозу здоровью и безопасности потребителей. В этом контексте алгоритмы мэтчинга являются важным инструментом, который позволяет предотвращать появление на площадке предложений и объявлений от неавторизованных посредников или продажи некачественной контрафактной продукции под видом известных торговых марок.

Исходя из вышеизложенного допустимо сделать вывод, что потенциал и возможности применения мэтчинга товаров выходят далеко за рамки одноложного инструмента для решения единственной задачи. Можно утверждать, что это основополагающая технология, которая позволяет оптимизировать множество различных бизнес-процессов, вести борьбу с мошенничеством и содействует повышению эффективности процесса ценообразования, формируя более прозрачную и удобную экосистему для участников рынка электронной коммерции — потребителей и продавцов.

## **2. Анализ существующих подходов и постановка задачи мэтчинга на маркетплейсах**

### **2.1. Мэтчинг товаров на основе сходства значений атрибутов и теоретико-множественные методы**

Сопоставление атрибутов товаров на основе сходства значений можно отнести к базовым подходам мэтчинга, который основывается на сравнении текстовых и числовых полей в различных характеристиках с целью определения насколько точно они совпадают между собой [7]. Текстовые атрибуты оцениваются с помощью таких метрик как расстояние Левенштейна, Джаро-Винклера или TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency), которые позволяют определить, насколько близко два фрагмента текста похожи друг на друга с учетом имеющихся различий в написании [8]. Числовые атрибуты (цена, вес, габаритные размеры и так далее) обычно оцениваются путем вычисления абсолютного или относительного отклонения. После подготовки и вычисления индивидуальных метрик сходства для каждого атрибута эти метрики объединяются, например с помощью взвешенной суммы, для получения общей оценки соответствия сравниваемых товаров. Если полученный показатель преодолевает установленное пороговое значение, то пара сравниваемых товаров

может считаться похожей. Кроме того, в теоретико-множественном подходе каждая карточка товара моделируется как множество атомарных элементов (признаков, n-грамм, токенов и так далее). Сходство между объектами определяется с помощью таких классических метрик, как коэффициенты Жаккара, Сёренсена–Дайса или Шимкевича–Симпсона. За счёт простоты вычислений данный подход позволяет обеспечить высокую скорость и простую масштабируемость, однако игнорирует порядок и контекст, что существенно ограничивает его точность. К ключевым преимуществам данного подхода можно отнести то, что он относительно прост и прямолинеен, характеризуется высокой прозрачностью и может быть легко реализован на практике. Среди существенных недостатков можно выделить трудности при работе с большими и разнообразными товарными категориями, проблемы с некачественными или зашумленными данными, а также крайне ограниченные возможности по выделению семантических значений.

### **2.2. Мэтчинг товаров на основе экспертной системы правил**

Логическим развитием подхода на основе сравнения значений атрибутов стала разработка подхода на основе системы правил [9, 10]. Мэтчинг, основанный на системе правил строится с помощью определяемых экспертами логических конструкций, которые описывают функционирование конкретной предметной области и позволяют определить степень схожести оцениваемых товаров. Каждое правило обычно оценивает подмножество четко заданных атрибутов и использует простые логические условия или пороговые значения (например, «Если название бренда идентично, а расстояние Левенштейна модели меньше двух, то такие два товара можно считать схожими»). Поскольку данный подход основан на системе правил, которые напрямую кодируют экспертные знания, их можно быстро и легко интерпретировать. Однако при работе с обширными и комплексными категориями система правил получается весьма громоздкой и сложной в обслуживании, а также нуждается в постоянном ручном обновлении и расширении. Кроме того, поскольку каждое правило должно быть определено экспертами вручную, эта система подвержена ошибкам и в конечном итоге оказывается недостаточно адаптированной и излишне перегруженной.

### **2.3. Мэтчинг товаров на основе таксономий и онтологий**

Эти методы опираются на глубокий контекстуально-семантический анализ сведений о предметной области и применяют структурированное представление для отображения взаимосвязей товаров и их атрибутов в виде графа знаний [11, 12]. Взаимосвязи могут указывать на общие характеристики (например, на определенный бренд или семейство продуктов), иерархическое наследование или дескриптивные взаимоотношения. Моделирование данных с помощью графа зависимостей открывает возможность более глубокого исследования доступной информации, позволяя учитывать контекст, внутренние отношения между сущностями и скрытые паттерны. Вместо того, чтобы полагаться исключительно на попарное сравнение атрибутов, данный подход позволяет выявлять комплексные зависимости, оперировать сложными логическими связями и оценивать структурные характеристики в совокупности. Кроме того, построенные онтологии и таксономии могут внести весомый вклад при проведении стандартизации или согласовании разрозненных сведений, что имеет важное значение при интеграции данных из нескольких источников [13]. Среди ключевых преимуществ данного подхода можно выделить его холистический взгляд, который позволяет обнаруживать кластеры и связанные компоненты эквивалентных товаров путем анализа целых подграфов, иногда выявляя совпадения, пропущенные при использовании более простых подходов. Однако, построение и поддержание всеобъемлющего графа знаний, как правило, является трудоемким и ресурсоемким процессом, который нуждается в регулярном обновлении при расширении ассортимента товаров или появлении новых источников данных. Также стоит отметить, что неполные или противоречивые таксономии и онтологии могут критически влиять на точность мэтчинга, нивелируя все преимущества данного подхода.

### **2.4. Мэтчинг товаров на основе машинного обучения**

Подходы на основе машинного обучения и глубоких нейросетей рассматривают задачу мэтчинга как задачу оптимизации целевого функционала [14, 15]. В этой формулировке обученная модель оценивает множество атрибутов и определяет со-

ответствуют ли они аналогичному товару. Методы классического машинного обучения начинаются с выбора и инжиниринга коллекции признаков, которые позволяют репрезентативно представить товар. Затем эти подготовленные признаки передаются в некоторый бинарный классификатор (логистическая регрессия, случайный лес, SVM и так далее), который тренируется отличать похожие товары на основе зависимостей в исходном пространстве признаков. Использование таких методов требует наличия предварительно размеченного набора данных с указанием метки целевого класса, который позволяет модели определить как сходства или различия в наборе признаков влияют на вероятность совпадения товаров. Методы классического машинного обучения могут обеспечить высокую точность предсказаний, однако нуждаются в разметке, сильных знаниях предметной области и тщательном инжиниринге исходных признаков, что вызывает необходимость постоянной адаптации при изменениях в данных или их распределении. Методы глубокого обучения позволяют значительно сократить или полностью устранить затраты, которые связаны с инжинирингом признаков за счет автоматического выявления паттернов в данных. В качестве базовых моделей могут применяться рекуррентные нейронные сети (RNN), сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), а также сверточные нейронные сети (CNN). После обработки такой моделью исходных признаков формируется эмбединг, представляющий собой характеристический вектор, который затем используется для оценки схожести товаров. К основным преимуществам моделей на основе глубокого обучения можно отнести их более высокую точность обработки зашумленных или разнородных данных, отсутствие необходимости тщательного инжиниринга признаков, а также повышенную устойчивость при обработке ранее неизвестных данных. Однако они сталкиваются с рядом проблем, которые связаны с выделением и пониманием семантического значения, а также требуют наличия предварительно размеченных данных.

### **2.5. Постановка задачи мэтчинга товаров на маркетплейсах**

Исходя из проведенного анализа и особенностей функционирования маркетплейсов становится понятно, что к типичным сложностям мэтчинга можно отнести: неоднозначность описаний и исполь-

зование маркетинговых терминов, дублирование и пропуски в данных, мультиформатность (текстовые описания, изображения, табличные параметры) и различный уровень детализации. Все эти факторы повышают риски ошибочного сопоставления товаров или, наоборот, пропуска потенциальных совпадений. Таким образом, требуется разработать мультимодальную модель, способную обрабатывать как визуальную компоненту, так и характеристики товара с учетом их семантического значения. Такая постановка задачи связана с разнородным характером данных и высокой вариативностью цифровой среды. Использование только характеристик часто оказывается недостаточным и может привести к ошибке мэчнинга, особенно если речь идет о товарах, отличительные черты которых заметны на изображениях. Аналогично, изображения сами по себе могут быть неоднозначными или выглядеть практически идентично. Таким образом, за счёт интеграции этих компонентов в единую систему, модель будет более эффективно и комплексно выполнять мэчнинг.

### 3. Мультимодальная модель мэчнинга товаров на маркетплейсах (МММР)

Пусть задано множество информационных карточек  $\Omega = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ , содержащее сведения о каждом товаре. Требуется разработать модель  $\Psi$  (1), которая отображает множество  $\Omega$  в пространство  $\mathbb{R}^d$  таким образом, чтобы данное векторное представление позволяло оценить степень подобия между любыми парами товаров из  $\Omega$  согласно (2), где  $S$  мера сходства:

$$\Psi(p_i) = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_d); p_i \in \Omega, \quad (1)$$

$$S: \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d \rightarrow [0, 1]. \quad (2)$$

Так как модель должна обрабатывать несколько модальностей, то ее концептуальное представление можно разложить на составляющие компоненты согласно (3):

$$\Psi(p_i) = \text{Concat}(\psi_{\text{title}}(p_i), \psi_{\text{image}}(p_i), \psi_{\text{metadata}}(p_i)); p_i \in \Omega, \quad (3)$$

где  $\psi_{\text{title}}$  кодирует в векторное представление название товара;

$\psi_{\text{image}}$  кодирует в векторное представление изображение товара;

$\psi_{\text{metadata}}$  кодирует в векторное представление характеристики товара.

Поскольку необходимо учитывать контекст и семантические значения, то в настоящей работе предлагается использовать в качестве основы архитектуру трансформера, предложенную в [16]. Известно, что эта архитектура позволяет представить текстовые данные в векторном виде и, благодаря механизму внимания в сочетании с глубокими нейронными сетями, эффективно улавливает семантические и контекстуальные особенности [17]. В отличие от традиционных моделей генерации эмбеддингов, таких как Word2Vec [18] и GloVe [19], назначающих каждому слову фиксированный вектор, трансформер создает динамические, контекстно-связанные эмбеддинги. Это означает, что одно и то же слово может иметь разные представления в зависимости от контекста его использования в предложении. Учитывая, что в настоящей работе решается задача векторного представления, то интерес представляет исключительно блок кодировщика. Архитектура кодировщика включает три ключевых элемента: многослойный механизм внимания (self-attention), слой остаточного соединения и нормализации, а также нейронную сеть прямого распространения. Рассмотрим основные преобразования.

Пусть задано множество входных токенов  $t = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ , каждому из которых сопоставим собственный эмбеддинг как указано в (4):

$$\text{Embed: } t_n \rightarrow e_i \in \mathbb{R}^{d_{\text{model}}}, \quad (4)$$

где  $d_{\text{model}}$  соответствует размерности эмбеддингов модели.

Для учета порядка следования элементов используется позиционная кодировка вида (5, 6):

$$PE(pos, 2i) = \sin\left(\frac{pos}{10000^{2i/d_{\text{model}}}}\right), \quad (5)$$

$$PE(pos, 2i + 1) = \cos\left(\frac{pos}{10000^{2i/d_{\text{model}}}}\right), \quad (6)$$

где  $pos$  – позиция в последовательности;

$i$  – размерность.

Затем на вход первого блока кодировщика подается (7):

$$X = (e_1 + \rho e_1, e_2 + \rho e_2, \dots, e_n + \rho e_n) \in \mathbb{R}^{n \times d_{\text{model}}}. \quad (7)$$

Каждый блок кодировщика содержит элемент механизма внимания, использующий матрицы за-

просов ( $Q$ ), ключей ( $K$ ) и значений ( $V$ ), которые определяются согласно (8):

$$Q = XW^Q, K = XW^K, V = XW^V; \\ W^Q, W^K, W^V \in \mathbb{R}^{d_{model} \times d_k}, \quad (8)$$

где  $W^Q$ ,  $W^K$  и  $W^V$  – обучаемые параметры модели;

$d_k$  – обычно определяется как отношение  $d_{model}$  к количеству слоев механизма внимания.

Оценка значимости на основе механизма внимания вычисляется согласно (9):

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax} \left( \frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right) V. \quad (9)$$

В архитектуре трансформера применяется множество слоев внимания, которые конкатенируются между собой согласно (10) и (11):

$$\text{head}_i = \text{Attention}(Q_i, K_i, V_i), \quad (10)$$

$$\text{MultiHead}(X) = \\ = \text{Concat}(\text{head}_1, \text{head}_2, \text{head}_3, \dots, \text{head}_n)W^O, \quad (11)$$

где матрица  $W^O$  также является обучаемым параметром модели.

Важной частью архитектуры трансформера является слой остаточного соединения [20] и нормализации [21], применяемый после механизма внимания согласно (12):

$$X_{att} = \text{LayerNorm}(X + \text{MultiHead}(X)). \quad (12)$$

Каждый блок кодировщика также содержит нейронную сеть прямого распространения обычно в форме двухслойного MLP (13) с нелинейностью вида ReLU (или GeLU):

$$\text{FFN}(X_{att}) = \max(0, X_{att} W_1 + b_1) W_2 + b_2, \quad (13)$$

после которой повторно применяется слой остаточного соединения и нормализации. Полученный выход одного блока кодировщика последовательно передается через  $N$  аналогичных кодировщиков, формируя в результате их выполнения итоговый результат. Концептуальное представление архитектуры кодировщика показано на *рисунке 1*.

Задача определения степени схожести названия товара требует надежного представления семантики предложений, которое позволяет эффективно и точно сопоставлять текстовое содержимое. Традиционные модели на основе архитектуры трансформера, такие как BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) [22], продемонстрировали значительный успех в различных проблемах обработки естественного языка (NLP). Однако BERT оптимизирован для решения задач на уровне токенов и не создает целостных эмбеддингов фиксированного размера на уровне предложений. Для преодоления этого ограничения предлагается использовать Sentence-BERT [23], который специально разработан для генерации эмбеддингов на уровне предложений и использует структуру сиамской нейронной сети. В отличие от BERT, который обрабатывает каждую пару отдельно, Sentence-BERT выполняет кодирование в плотный вектор фиксированного размера, что позволяет эффективно вычислять косинусное сходство предложений в векторном пространстве. Кроме того, Sentence-BERT может обучаться с использованием контрастных функций потерь вида (14), которые позволяют явно оптимизировать модель для выявления семантического сходства предложений, а не просто контекстуальных связей на уровне токенов:

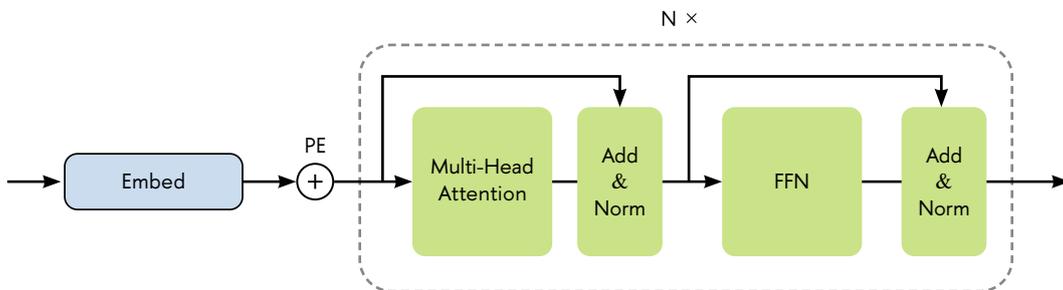


Рис. 1. Архитектура кодировщика.

$$L = (1 - y_k) \|f(x_i) - f(x_j)\|_2^2 + y_k (\max(0, m - \|f(x_i) - f(x_j)\|_2))^2, \quad (14)$$

где  $x_i$  и  $x_j$  — являются парой объектов;

$y_k$  — бинарная метка, которая принимает значение 0, если объекты являются похожими, и значение 1, если они отличаются;

$m$  — определяет границу разделения между объектами.

Основываясь на вышеизложенном и учитывая поставленную задачу, в данной работе предлагается использовать Sentence-BERT для формирования высококачественных эмбеддингов предложений, которые позволят эффективно оценивать степень схожести опираясь на семантические связи между названиями товаров, представленных в текстовой форме и, таким образом, получим робастную реализацию компонента  $\psi_{title}$ . Используя сгенерированные эмбеддинги, применим в качестве критерия косинусное сходство (15):

$$\text{Sim}(e_i, e_j) = \frac{e_i \cdot e_j}{\|e_i\| \|e_j\|}. \quad (15)$$

Для определения визуальной компоненты модели  $\psi_{image}$  необходимо учесть, что на цифровых платформах размещается большое количество разнообразных товаров, которые имеют существенные различия в качестве изображений, ракурсе, освещении, затемнениях и расположении элементов, что в совокупности делает традиционные методы оценки степени схожести недостаточно эффективными. Известно, что такие традиционные сверточные нейронные сети, как ResNet [24] или EfficientNet [25], широко применяются для поиска похожих изображений. Однако они полагаются на локальные свертки и по этой причине имеют фиксированное поле восприятия, что может ограничивать их способность захватывать разрозненные или сильно удаленные друг от друга взаимосвязи между элементами изображения. При мэтчинге товаров важное значение имеют тонкие взаимосвязи между такими элементами, как логотипы, надписи и формы, а CNN часто не удается эффективно справляться с обработкой этих зависимостей. Кроме того, CNN оказываются крайне чувствительны к вышеописанным различиям в изображениях, что также ставит под вопрос эффективность их применения для решения поставленной задачи. Для

преодоления данной проблемы в настоящей работе предлагается использовать архитектуру визуального трансформера (ViT), которая описана в работе [26]. Визуальный трансформер обрабатывает изображения как последовательность фрагментов и использует механизм внимания для фиксации как локальных, так и глобальных взаимосвязей в рамках изображения. В отличие от CNN, которые извлекают признаки иерархическим способом, визуальный трансформер анализирует все изображение одновременно, что позволяет динамически отслеживать наиболее важные области. Эта отличительное свойство делает ViT особенно полезными для оценки сходства предметов одежды, электроники, а также товаров широкого потребления, где различия в текстуре, размещении бренда и различных искажениях могут оказывать существенное влияние на итоговую оценку. Еще одним важным преимуществом визуального трансформера в рамках рассматриваемой задачи является его высокая устойчивость к окклюзиям в изображениях. Например, ViT может правильно идентифицировать модель товара даже если логотип бренда частично скрыт или изображение снято под другим углом, что, как правило, не удается традиционным CNN. Также стоит отметить, что визуальные трансформеры обладают большим потенциалом к интеграции изображения и текстового описания с целью вычисления семантического сходства между ними [27]. Это особенно полезно в сценариях поиска товаров, где различные текстовые характеристики товара (название, описание, марка, модель и так далее) и его изображение могут быть сопоставлены между собой для проверки их соответствия.

Исходя из вышеизложенного в настоящей работе предлагается определить  $\psi_{image}$  как многоэтапный конвейер, состоящий из предварительной тренировки, тонкой настройки и выполнения последующей оценки.

На первом этапе проведем начальное обучение на большом объеме данных для формирования обобщенных представлений и выделения базовых признаков. Пусть  $f_\theta$  задает параметризованный  $\theta$  визуальный трансформер (ViT) и имеется набор данных, который содержит изображения всех товаров  $I = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ . Применив метод самообучающейся дистилляции (DINO) [28] проведем оптимизацию согласно (16) и для каждого изображения товара сформируем начальный эмбеддинг (17):

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} L_{SSL}(f_{\theta}, I). \quad (16)$$

$$e_i = f_{\theta^*}(x_i) \forall x_i \in I. \quad (17)$$

На втором этапе проведем адаптацию визуального трансформера. Для этого используем подмножества изображений товаров, полученные путем разделения  $I$  по категориям и ценовым сегментам, выполнив тонкую настройку согласно (18):

$$L = \max \left( \begin{array}{l} \left\| f_{\theta^*}(x_a) - f_{\theta^*}(x_p) \right\|_2^2 - \\ - \left\| f_{\theta^*}(x_a) - f_{\theta^*}(x_n) \right\|_2^2 + \alpha, 0 \end{array} \right), \quad (18)$$

где  $x_a$  — является опорным объектом;

$x_p$  — обозначает объект схожий с опорным;

$x_n$  — представляет объект, который является отличным от  $x_a$  и  $x_p$ .

После завершения тонкой настройки используем (15) для оценки схожести между любой парой векторных представлений  $e_i$  и  $e_j$ . Описанный конвейер позволит обеспечить высокую эффективность и точность компонента  $\psi_{image}$ .

При определении третьего компонента модели  $\psi_{metadata}$  необходимо учесть, что характеристики товаров на торговых площадках содержат различные типы данных включая числовые переменные, такие как вес, объем или размер, а также категориальные переменные, такие как комплектация, цвет или состав. Традиционные подходы обычно используют многослойный перцептрон (MLP) или ансамблевые методы, которые часто сталкиваются с трудностями при обнаружении комплексного взаимодействия между множеством разнообразных признаков при условии отсутствия предварительного инжиниринга данных. Учитывая характер и специфику предметной области разумно предположить, что определенные признаки, в табличном представлении характеристик товаров, могут взаимодействовать между собой нетривиальным способом. Подобные взаимодействия имеют важное значение в рамках решаемой задачи поскольку даже небольшие различия (например, в составе материалов между «хлопок» и «полихлопок») оказывают существенное влияние на оцениваемую идентичность характеристик. Как было описано ранее, в основе архитектуры трансформера лежит механизм внимания, который позволяет обнаруживать как признаки взаимосвязаны между собой. Контекстно-зависимые эмбединги, создаваемые трансфор-

мером, формируют векторные представления, которые размещают схожие элементы близко друг к другу в пространстве признаков с учетом их взаимосвязей, что позволяет более точно отличать схожие товары на основе имеющихся характеристик. Более того, механизм внимания эффективно выявляет взаимодействия признаков в автоматизированном режиме, что устраняет необходимость участия экспертов предметной области и проведение инжиниринга данных в ручном режиме. Помимо высокой гибкости в отношении признаков, трансформер эффективно справляется с проблемой обработки недостающих или искаженных данных, которая неизбежно возникает на крупных платформах электронной коммерции. Кроме того, некоторые исследования [29, 30], связанные с развитием идеи применения трансформеров для работы с табличными данными, продемонстрировали, что такие архитектуры могут превосходить традиционные подходы.

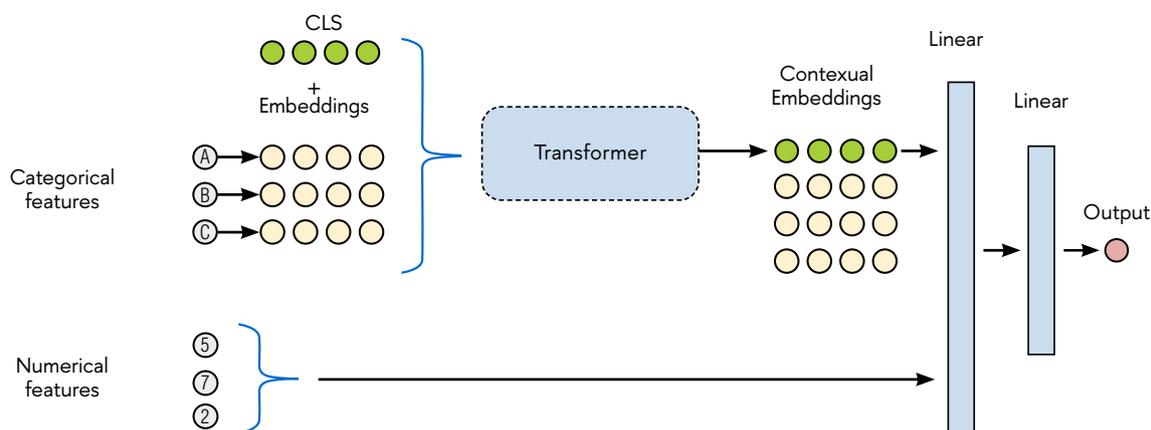
Исходя из вышеизложенного, компонент модели  $\psi_{metadata}$  определяется с применением концепции табличного трансформера. Адаптированная для решения поставленной задачи архитектура, предлагаемая в настоящей работе, показана на *рисунке 2*. Для оценки сходства между любой парой товаров с помощью табличного трансформера будем использовать (15).

Предложенная архитектура табличного трансформера, благодаря использованию контекстно-зависимых эмбедингов для категориальных признаков, специализированной обработки числовых переменных и механизма внимания для выявления сложных взаимодействий, эффективно формирует векторное представление характеристик товара. Это особенно актуально в крупномасштабных и разнородных каталогах, которые являются типичными для цифровых торговых площадок.

После определения всех составляющих итоговую меру сходства зададим с помощью метода взвешенных оценок согласно (19):

$$S(p_i, p_j) = w_1 \text{Sim}(\psi_{title}(p_i), \psi_{title}(p_j)) + \\ + w_2 \text{Sim}(\psi_{image}(p_i), \psi_{image}(p_j)) + \\ + w_3 \text{Sim}(\psi_{metadata}(p_i), \psi_{metadata}(p_j)), \sum w_i = 1. \quad (19)$$

В которой весовые коэффициенты  $w_1$ ,  $w_2$  и  $w_3$  могут быть гибко настроены с учетом особенностей и специфики выполняемого мэтинга.

Рис. 2. Архитектура компонента  $\psi_{metadata}$ 

#### 4. Применение модели МММР для оценки схожести товаров на маркетплейсе Wildberries

В рамках проводимого эксперимента было принято решение провести исследование товаров, которые представлены на платформе Wildberries. Основной фокус направлен на товарную категорию «Смартфоны», выбор которой обуславливается рядом значимых факторов. Во-первых, смартфоны представляют собой сложные технические устройства с широким набором характеристик, включая как количественные (например, объем памяти, емкость аккумулятора и так далее), так и категориальные (марка, операционная система и так далее) признаки. Это делает их удобным объектом для тестирования в условиях неоднородности признаков. Во-вторых, ассортимент таких устройств на маркетплейсах достаточно обширен и разнообразен, что позволяет изучить работу модели на данных с высокой степенью вариативности. В-третьих, данная категория является одной из популярных и востребованных на маркетплейсах, что делает результаты исследования практически значимыми. Всё это в совокупности позволяет эффективно проверить возможность определения степени схожести товаров. Таким образом, выбор категории «Смартфоны» позволяет протестировать предложенную модель в условиях реальных данных, обеспечивая достаточную сложность и разнообразие для оценки ее работоспособности. Из этого следует, что успешный опыт применения модели в данной товарной группе может быть перенесен и на другие категории, включая технически сложные товары.

В ходе реализации эксперимента был собран набор данных из 12233 карточек товаров. Каждая карточка содержит информацию о конкретном реализуемом на платформе товаре и включает следующие признаки: X1 – изображение товара, X2 – название товара, X3 – цвет, X4 – модель, X5 – тип SIM карты, X6 – операционная система, X7 – версия операционной системы, X8 – гарантийный срок, X9 – степень пылевлагозащиты, X10 – тип дисплея, X11 – диагональ экрана, X12 – разрешение экрана, X13 – частота обновления экрана, X14 – защитное покрытие экрана, X15 – объем встроенной памяти, X16 – объем оперативной памяти, X17 – основная камера, X18 – фронтальная камера, X19 – особенности объектива, X20 – встроенная вспышка, X21 – емкость аккумулятора, X22 – модель процессора, X23 – количество ядер процессора, X24 – стандарт связи, X25 – беспроводные интерфейсы, X26 – спутниковая навигация, X27 – вид разъема подключения к устройству, X28 – дополнительные опции, X29 – комплектация, X30 – описание товара, X31 – страна производства, X32 – количество SIM карт, X33 – состояние товара, X34 – тактовая частота процессора, X35 – вес товара с упаковкой, X36 – срок эксплуатации.

Фрагмент собранных данных показан в *таблице 1*.

Перед использованием собранных данных для обучения модели была проведена тщательная предварительная обработка, направленная на обеспечение их надлежащего качества, согласованности и пригодности для дальнейшего анализа. Эти работы включали в себя очистку, удаление дубликатов,

Таблица 1.

## Фрагмент собранных данных

	Товар 1	Товар 2	Товар 3	Товар 4
Изображение				
Название	Смартфон Apple iPhone 16 Pro Max Золотистый/ Desert 512 Гб	Смартфон Apple iPhone 16 Pro Max Белый/White 1 Тб	Смартфон Galaxy S24 Ultra 512 Гб Yellow Желтый	Смартфон Xiaomi 14 12/256 Гб 5G Белый PCT
Цена	168 750	182 267	159 800	77 585
Модель	iPhone 16 Pro Max	iPhone 16 Pro Max	S24	Xiaomi 14
Версия ОС	iOS 18	IOS 18	Android 14	Android 14
Гарантийный срок	1 год	1 год	1 год	1 год
Тип дисплея	Super Retina XDR OLED ProMotion	Super Retina XDR OLED ProMotion	Dynamic AMOLED 2X	LTPO AMOLED
Диагональ экрана	6.9"	6.9"	6.8"	6.36"
Разрешение экрана	2868x1320	2868x1320	3120x1440	2670x1200
Объем встроенной памяти	512 Гб	1 Тб	512 Гб	256 Гб
Объем оперативной памяти	8 Гб	8 Гб	12 Гб	12 Гб
Беспроводные интерфейсы	Wi-Fi 7; NFC; Bluetooth 5.3	Wi-Fi 7; NFC; Bluetooth 5.3	Wi-Fi; NFC; Bluetooth	Wi-Fi; ИК-Порт; NFC; Bluetooth
...	...	...	...	...

обработку пропущенных значений, исправление несоответствий, нормализацию числовых данных, а также токенизацию текстовой информации. Дополнительно для минимизации влияния аномальных значений была проведена работа по обнаружению и удалению выбросов.

После обучения модели были получены оценки схожести для товаров, показанных в *таблице 1*, результаты которых приведены в *таблице 2*. Эффективность предложенного метода была также

оценена путём сопоставления с наивным базовым подходом, реализованного на основе сравнения товаров с использованием коэффициента Жаккара без предварительной токенизации.

Экспериментальная часть исследования подтвердила эффективность разработанного подхода. В частности, данные *таблицы 2* демонстрируют пример оценок сходства, рассчитанных моделью МММР для четырёх товарных позиций (Товар 1, Товар 2, Товар 3 и Товар 4). Наиболее высокое зна-

Таблица 2.

## Оценка схожести товаров

		Товар 1	Товар 2	Товар 3	Товар 4
Товар 1	МММР	1	0,98657	0,877564	0,544109
	Jaccard	1	0,308	0,11	0,077
Товар 2	МММР	0,98657	1	0,883621	0,549463
	Jaccard	0,308	1	0,10	0,11
Товар 3	МММР	0,877564	0,883621	1	0,670598
	Jaccard	0,11	0,10	1	0,13
Товар 4	МММР	0,544109	0,549463	0,670598	1
	Jaccard	0,077	0,11	0,13	1

чение сходства (0,98657) наблюдается между Товаром 1 и Товаром 2, что свидетельствует о правильной идентификации практически идентичных позиций при наличии различных описаний с использованием различных модальностей данных. При этом менее похожие позиции (например, Товар 1 и Товар 4) получили намного более низкий коэффициент сходства (0,544109), что говорит о корректном разграничении моделью групп товаров с разным набором характеристик и описаний. Аналогичные результаты (0,549463 между Товаром 2 и Товаром 4, а также 0,670598 между Товаром 3 и Товаром 4) показывают, что модель способна отличить даже незначительные различия в характеристиках товаров и при этом способна выявлять интересные паттерны в их описании. Следовательно, предложенный подход надёжно справляется с выявлением как очевидных, так и более тонких совпадений и при этом не позволяет объединить записи о товарах в одну группу, если товары в действительности различаются.

Полученные результаты подтверждают, что мультимодальная модель на базе трансформера способна эффективно решать задачу мэтчинга в условиях большого разнообразия товарных позиций при разнородности источников данных. Корректная идентификация записей о товарных позициях на маркетплейсах сокращает риски дублирования и ошибок в аналитике, положительно сказываясь на всех этапах экономической деятельности в рамках экосистемы цифровых платформ, а также позволяет продавцам и покупателям более точно ориентироваться в ассортименте, упрощая

процесс принятия решений. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о корректной работе модели в рамках поставленной задачи, открывая возможность ее применения для интеллектуального мэтчинга товарных предложений на маркетплейсах.

### Заключение

В ходе проведённого исследования была предложена и решена задача интеллектуального мэтчинга товаров на маркетплейсах, требующая комплексного анализа и обработки мультимодальных данных и применения современных инструментальных методов в рамках построения экономико-математической модели (МММР). В первом разделе статьи был раскрыт потенциал применения мэтчинга товаров на маркетплейсах, как типичных представителей цифровых платформ, и показана взаимосвязь между возможностями интеллектуального мэтчинга и ключевыми экономическими показателями деятельности в рамках рынка электронной коммерции. Проведенный во втором разделе анализ существующих подходов к entity resolution (ER) и анализу мультимодальных данных позволил выявить ключевую проблему сопоставления записей о товарах на маркетплейсах смысл которой заключается в том, что товары описываются различными продавцами с разным уровнем детализации и в разных форматах (текст, изображения, табличные характеристики и т.д.). В третьем разделе описан детальный процесс разработки мультимодальной модели мэтчинга (МММР), ядром которой явля-

ются модули на базе трансформеров для обработки текстовых, визуальных и табличных данных. Описанная архитектура учитывает гибкость механизма внимания и обладает способностью к самообучению при расширении ассортимента товаров на маркетплейсах и появлению новых неструктурированных описаний с учетом визуальных компонент данных. МММР позволяет эффективно интегрировать многообразие входных модальностей данных, а также учитывать сложные контекстные взаимосвязи, важные для корректного определения сходства или различия товарных позиций с учетом ценовых характеристик.

Наконец, в четвёртом разделе было продемонстрировано применение предложенной модели для оценки схожести товарных позиций на маркетплейсе Wildberries, где полученные результаты подтвердили высокую точность и стабильность работы МММР.

Таким образом, основные выводы по статье можно представить в аксиоматической форме:

- ◆ обоснована высокая релевантность мультимодального анализа для задач мэтчинга в условиях растущего многообразия товарных позиций на маркетплейсах;
- ◆ определена перспективность применения архитектур трансформера для комплексной обработки текстовых, визуальных и табличных признаков;
- ◆ выявлена необходимость дальнейшей адаптации подобных моделей к изменяющимся условиям рынка;

◆ разработана модель МММР, которая может использоваться как в научных исследованиях по интеллектуальной идентификации записей о товарах на маркетплейсах, так и в практических целях участниками рынка электронной коммерции, где точность сопоставления записей о товарах является критически важной, например, для ценообразования, а значит и для формирования равновесной модели спроса и предложения.

Результаты работы доказывают, что грамотно спроектированная архитектура модели глубокого обучения, интегрирующая в себе несколько модальностей данных, даёт ощутимое преимущество по сравнению с более простыми и узкоспециализированными существующими решениями. Кроме того, применение подобных моделей содействует повышению прозрачности и эффективности аналитических инструментов, а это, в конечном итоге, будет укреплять доверие продавцов и, что более важно доверие покупателей к определенному маркетплейсу в целом.

**Дальнейшие пути исследования** в рамках выбранной тематики могут заключаться в расширении набора обрабатываемых модальностей (например, анализ видеозаписей или аудиоинформации) и в создании самообучающихся механизмов, позволяющих автоматически перенастраивать модель при изменении структуры данных. Также вектор дальнейшего развития модели МММР предполагает интеграцию методов активного обучения (в реальном режиме времени), поскольку это позволит быстрее накапливать и обрабатывать релевантные примеры для уточнения критериев мэтчинга, в том числе и на маркетплейсах. ■

### Литература

1. Fletcher A., Ormosi P.L., Savani R. Recommender systems and supplier competition on platforms // *Journal of Competition Law & Economics*. 2023. Vol. 19. No. 3. P. 397–426. <https://doi.org/10.1093/joclec/nhad009>
2. Hussien F.T.A., Rahma A.M.S., Abdulwahab H.B. An e-commerce recommendation system based on dynamic analysis of customer behavior // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 19. Article 10786. <https://doi.org/10.3390/su131910786>
3. Studying product competition using representation learning / F. Chen [et al.] // *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR '20)*. 2020. P. 1261–1268. <https://doi.org/10.1145/3397271.3401041>
4. Hu S., Wei M.M., Cui S. The role of product and market information in an online marketplace // *Production and Operations Management*. 2023. Vol. 32. No. 10. P. 3100–3118. <https://doi.org/10.1111/poms.14025>
5. Detecting online counterfeit-goods seller using connection discovery / M. Cheung [et al.] // *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*. 2019. Vol. 15. No. 2. Article 35. <https://doi.org/10.1145/3311785>
6. Sun J., Zhang X., Zhu Q. Counterfeiters in online marketplaces: Stealing your sales or sharing your costs // *Journal of Retailing*. 2020. Vol. 96. No. 2. P. 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2019.07.002>

7. Köpcke H., Thor A., Rahm E. Evaluation of entity resolution approaches on real-world match problems // *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2010. Vol. 3. Nos. 1–2. P. 484–493. <https://doi.org/10.14778/1920841.1920904>
8. Cohen W.W., Ravikumar P., Fienberg S.E. A comparison of string distance metrics for name-matching tasks // *Proceedings of Workshop on Information Integration (IJCAI-03)*. 2003. P. 73–78.
9. Synthesizing entity matching rules by examples / R. Singh [et al.] // *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2017. Vol. 11. No. 2. P. 189–202. <https://doi.org/10.14778/3149193.3149199>
10. Entity matching: How similar is similar / J. Wang [et al.] // *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2011. Vol. 4. No. 10. P. 622–633. <https://doi.org/10.14778/2021017.2021020>
11. Angermann H. TaxoMulti: Rule-based expert system to customize product taxonomies for multi-channel e-commerce // *SN Computer Science*. 2022. Vol. 3. Article 177. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01070-8>
12. Hybrid ecommerce recommendation model incorporating product taxonomy and folksonomy / M. Mao [et al.] // *Knowledge-Based Systems*. 2021. Vol. 214. Article 106720. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106720>
13. Aanen S.S., Vandic D., Frasinca F. Automated product taxonomy mapping in an e-commerce environment // *Expert Systems with Applications*. 2015. Vol. 42. No. 3. P. 1298–1313. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.032>
14. A machine learning approach for product matching and categorization: Use case: Enriching product ads with semantic structured data / P. Ristoski [et al.] // *Semantic Web*. 2018. Vol. 9. No. 4. P. 707–728. <https://doi.org/10.3233/SW-180300>
15. Shah K., Kopru S., Ruvini J.D. Neural network based extreme classification and similarity models for product matching // *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, New Orleans – Louisiana*. 2018. Vol. 3. P. 8–15. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/N18-3002>
16. Attention is all you need / A. Vaswani [et al.] // *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17), Long Beach, CA, USA*. 2017. P. 6000–6010.
17. Zhang H., Shafiq M.O. Survey of transformers and towards ensemble learning using transformers for natural language processing // *Journal of Big Data*. 2024. Vol. 11. Article 25. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00842-0>
18. Efficient estimation of word representations in vector space / T. Mikolov [et al.] // arXiv:1301.3781. 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1301.3781>
19. Pennington J., Socher R., Manning C.D. Glove: Global vectors for word representation // *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP), Doha, Qatar*. 2014. P. 1532–1543.
20. Deep residual learning for image recognition / He K. [et al.] // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA*. 2016. P. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
21. Ba J.L., Kiros J.R., Hinton G.E. Layer normalization. arXiv:1607.06450. 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.06450>
22. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding / Devlin J. [et al.] // *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Minneapolis, Minnesota*. 2019. Vol. 1. P. 4171–4186.
23. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks // *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP), Hong Kong, China*. Association for Computational Linguistics. 2019. P. 3982–3992. <https://doi.org/10.18653/v1/D19-1410>
24. Wu Z., Shen C., van den Hengel A. Wider or deeper: Revisiting the ResNet model for visual recognition // *Pattern Recognition*. 2019. Vol. 90. P. 119–133.
25. Tan M., Le Q. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks // *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*. 2019. Vol. 97. P. 6105–6114.
26. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale / A. Dosovitskiy [et al.] // arXiv:2010.11929. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>
27. Learning transferable visual models from natural language supervision / A. Radford [et al.] // *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning*. 2021. Vol. 139. P. 8748–8763.
28. Emerging properties in self-supervised vision transformers / M. Caron [et al.] // arXiv:2104.14294. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.14294>
29. TabTransformer: Tabular data modeling using contextual embeddings / X. Huang [et al.] // arXiv:2012.06678. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.06678>
30. Revisiting deep learning models for tabular data / Y. Gorishniy [et al.] // *Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'21)*. 2021. Article 1447. P. 18932–18943.

### Об авторах

**Варнухов Артем Юрьевич**

ассистент, кафедра бизнес-информатики, Уральский государственный экономический университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62;  
E-mail: varnuhov\_ayu@usue.ru

**Назаров Дмитрий Михайлович**

доктор экономических наук;  
заведующий кафедрой, кафедра бизнес-информатики, Уральский государственный экономический университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62;  
E-mail: slup2005@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-5847-9718

# Product matching in digital marketplaces: Multimodal model based on the transformer architecture

**Artem Yu. Varnukhov**

E-mail: varnuhov\_ayu@usue.ru

**Dmitry M. Nazarov**

E-mail: slup2005@mail.ru

Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

**Abstract**

In this paper we analyze the problem of intelligent product matching in digital marketplaces for which one requires evaluation of similarity of various records that describe products but may differ in format, content or volume of multimodal data. The subject area of this scientific research represents an intersection of entity resolution (ER) problem solving methods: record matching and multimodal data analysis. It is of extreme relevance in a fast-growing platform economy with the e-commerce market expanding exponentially. The main purpose of this research is to develop and test an intelligent multimodal model based on transformer architecture to improve the accuracy and robustness of product matching in digital marketplaces. The authors developed a model integrating textual, visual and tabular attributes which enables us to identify similar products, find competitive offers, detect duplicates and perform product clustering and segmentation in a more effective manner. The proposed approach is based on the self-attention mechanism which enables contextual-semantic relations modeling of various-nature data. In

order to extract the vector representation of text descriptions, language models are applied, in particular the Sentence-BERT architecture; for the graphical component Vision Transformer is used; and tabular data are processed using specialized learning mechanisms based on TabTransformer structured data. The experiment we carried out demonstrated that the developed multimodal model efficiently solves the task of product matching in digital marketplaces in an environment of significant variability of product items and data heterogeneity. Additionally, the results suggest that the model can be adapted successfully for application in other product categories. The results obtained confirm the efficiency and expediency to apply the multimodal approach for digital marketplace product matching implementation. This allows the e-commerce market participants to significantly improve the quality of inventory management, increase pricing efficiency and strengthen their competitive advantages.

**Keywords:** digital marketplace, contextual-semantic identification, competitive offers search, product matching, machine learning, deep learning, transformer architecture, data mining

**Citation:** Varnukhov A.Yu., Nazarov D.M. (2025) Product matching in digital marketplaces: Multimodal model based on the transformer architecture. *Business Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 7–24. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.7.24

## References

1. Fletcher A., Ormosi P. L., Savani R. (2023) Recommender systems and supplier competition on platforms. *Journal of Competition Law & Economics*, vol. 19, no. 3, pp. 397–426. <https://doi.org/10.1093/joclec/nhad009>
2. Hussien F.T.A., Rahma A.M.S., Abdulwahab H.B. (2021) An e-commerce recommendation system based on dynamic analysis of customer behavior. *Sustainability*, vol. 13, no. 19, article 10786. <https://doi.org/10.3390/su131910786>
3. Chen F., Liu X., Proserpio D., et al. (2020) Studying product competition using representation learning. *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR '20)*, pp. 1261–1268. <https://doi.org/10.1145/3397271.3401041>
4. Hu S., Wei M.M., Cui S. (2023) The role of product and market information in an online marketplace. *Production and Operations Management*, vol. 32, no. 10, pp. 3100–3118. <https://doi.org/10.1111/poms.14025>
5. Cheung M., She J., Sun W., Zhou J. (2019) Detecting online counterfeit-goods seller using connection discovery. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, vol. 15, no. 2, article 35. <https://doi.org/10.1145/3311785>
6. Sun J., Zhang X., Zhu Q. (2020) Counterfeiters in online marketplaces: Stealing your sales or sharing your costs. *Journal of Retailing*, vol. 96, no. 2, pp. 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2019.07.002>
7. Köpcke H., Thor A., Rahm E. (2010) Evaluation of entity resolution approaches on real-world match problems. *Proceedings of the VLDB Endowment*, vol. 3, nos. 1–2, pp. 484–493. <https://doi.org/10.14778/1920841.1920904>
8. Cohen W.W., Ravikumar P., Fienberg S.E. (2003) A Comparison of string distance metrics for name-matching tasks. *Proceedings of Workshop on Information Integration (IJCAI-03)*, pp. 73–78.
9. Singh R., Meduri V.V., Elmagarmid A., et al. (2017) Synthesizing entity matching rules by examples. *Proceedings of the VLDB Endowment*, vol. 11, no. 2, pp. 189–202. <https://doi.org/10.14778/3149193.3149199>
10. Wang J., Li G., Yu J.X., Feng J. (2011) Entity matching: How similar is similar. *Proceedings of the VLDB Endowment*, vol. 4, no. 10, pp. 622–633. <https://doi.org/10.14778/2021017.2021020>
11. Angermann H. (2022) TaxoMulti: Rule-based expert system to customize product taxonomies for multi-channel e-commerce. *SN Computer Science*, vol. 3, article 177. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01070-8>
12. Mao M., Chen S., Zhang F., et al. (2021) Hybrid ecommerce recommendation model incorporating product taxonomy and folksonomy. *Knowledge-Based Systems*, vol. 214, article 106720. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.106720>
13. Aanen S. S., Vandic D., Frasinca F. (2015) Automated product taxonomy mapping in an e-commerce environment. *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 3, pp. 1298–1313. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.032>
14. Ristoski P., Petrovski P., Mika P., Paulheim H. (2018) A machine learning approach for product matching and categorization: Use case: Enriching product ads with semantic structured data. *Semantic Web*, vol. 9, no. 5, pp. 707–728. <https://doi.org/10.3233/SW-180300>

15. Shah K., Kopru S., Ruvini J. D. (2018) Neural network based extreme classification and similarity models for product matching. Proceedings of the *2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, New Orleans – Louisiana*, vol. 3, pp. 8–15. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/N18-3002>
16. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et. al. (2017) Attention is all you need. Proceedings of the *31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17), Long Beach, CA, USA*, pp. 6000–6010. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.5555/3295222.3295349>
17. Zhang H., Shafiq M.O. (2024) Survey of transformers and towards ensemble learning using transformers for natural language processing. *Journal of Big Data*, vol. 11, article 25. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00842-0>
18. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. (2013) Efficient estimation of word representations in vector space. *arXiv:1301.3781*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1301.3781>
19. Pennington J., Socher R., Manning C. D. (2014) GloVe: Global vectors for word representation. Proceedings of the *2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP), Doha, Qatar*, pp. 1532–1543.
20. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. (2016) Deep residual learning for image recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA*, pp. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
21. Ba J.L., Kiros J.R., Hinton G.E. (2016) Layer normalization. *arXiv:1607.06450*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.06450>
22. Devlin J., Chang M. W., Lee K., Toutanova K. (2019) Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. Proceedings of the *2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Minneapolis, Minnesota*, vol. 1, pp. 4171–4186. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>
23. Reimers N., Gurevych I. (2019) Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks. Proceedings of the *2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP), Hong Kong, China*, pp. 3982–3992. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/D19-1410>
24. Wu Z., Shen C., van den Hengel A. (2019) Wider or deeper: Revisiting the ResNet model for visual recognition. *Pattern Recognition*, vol. 90, pp. 119–133. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2019.01.006>
25. Tan M., Le Q. (2019) EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. Proceedings of the *36th International Conference on Machine Learning*, vol. 97, pp. 6105–6114.
26. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., et al. (2021) An image is worth 16x16 words: transformers for image recognition at scale. *arXiv:2010.11929*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>
27. Radford A., Kim J. W., Hallacy C., et. al. (2021) Learning transferable visual models from natural language supervision. Proceedings of the *38th International Conference on Machine Learning*, vol. 139, pp. 8748–8763.
28. Caron M., Touvron H., Misra I., et. al. (2021) Emerging properties in self-supervised vision transformers. *arXiv:2104.14294*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.14294>
29. Huang X., Khetan A., Cvitkovic M., et. al. (2020) TabTransformer: Tabular data modeling using contextual embeddings. *arXiv:2012.06678*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.06678>
30. Gorishniy Y., Rubachev I., Khrulkov V., et. al. (2021) Revisiting deep learning models for tabular data. Proceedings of the *35th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'21)*, article 1447, pp. 18932–18943.

### About the authors

#### Artem Yu. Varnukhov

Assistant, Department of Business Informatics, Ural State University of Economics, 62, 8 Marta St., Yekaterinburg 620144, Russia;  
E-mail: varnuhov\_ayu@usue.ru

#### Dmitry M. Nazarov

Doctor of Sciences (Economics);  
Head of Department, Department of Business Informatics, Ural State University of Economics, 62, 8 Marta St., Yekaterinburg 620144, Russia;  
E-mail: slup2005@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-5847-9718

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.25.40

# Разработка рекомендательных систем для повышения эффективности регулируемых закупок в электроэнергетике

**А.И. Денисова**<sup>a</sup> 

E-mail: a.i.denisova@inbox.ru

**Д.А. Созаева**<sup>a,b</sup> 

E-mail: dasozaeva@gmail.com

**К.В. Гончар**<sup>a,c</sup> 

E-mail: goncharkv@gmail.com

<sup>a</sup> Государственный университет управления, Москва, Россия

<sup>b</sup> Университет «Синергия», Москва, Россия

<sup>c</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## Аннотация

В статье рассмотрены пути повышения эффективности функционирования рынка регулируемых закупок за счет внедрения рекомендательных систем в существующую ИТ-инфраструктуру закупок. На примере государственных, муниципальных и коммерческих закупок электроэнергетических товаров рассмотрены перспективные для внедрения классы рекомендательных систем, предложена методология разработки подобных сервисов, раскрыты алгоритмы обработки, конфигурации и интерпретации данных, необходимых для их функционирования. Обосновано отличие авторского подхода к созданию сервисов от ранее опубликованных работ, проведена апробация и А/В тестирование, представлена оценка эффективности. Получены результаты, имеющие научную новизну (обоснована методология использования нейронных сетей применительно к отрасли закупок) и практическую значимость (достигнута экономия времени заказчика на поиск поставщиков до 40%, расширен пул потенциальных поставщиков, диверсифицированы риски поставщиков за счет подбора релевантных для них процедур из новых сфер и от новых заказчиков, обеспечена возмож-

ность поставщикам находить до 2–3 новых заказчиков за 1 рекомендательную рассылку с периодичностью 1–2 раза в неделю). Предложено внедрение разработок в практику оператора электронных торгов по госзакупкам. Дальнейшее развитие рекомендательных сервисов и решений для сферы закупок авторы видят в улучшении анализа семантического (текстового, логического, визуального) содержания документов закупки, а также поведенческих стратегий поставщиков. Риски и ограничения же связывают с дороговизной содержания штата разработчиков-практиков по нейронным сетям, возможными галлюцинациями нейронных сетей и их высокой чувствительностью к ошибке и качеству исходных данных-сетей.

**Ключевые слова:** рекомендательные системы, эффективность регулируемых закупок, вероятность победы в госзакупках, персонализированные рекомендации, «незакрытие» торгов, конкуренция в закупках

**Цитирование:** Денисова А.И., Созаева Д.А., Гончар К.В. Разработка рекомендательных систем для повышения эффективности регулируемых закупок в электроэнергетике // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 2. С. 25–40. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.25.40

## Введение

Совершенствование ИТ-решений и развитие цифровой экосистемы для проведения государственных и муниципальных закупок, закупок компаний с государственным участием (далее – госзакупки, регулируемые закупки) являются приоритетными задачами государственной программы РФ «Управление государственными финансами и регулирование финансовых рынков» на период до 2030 года [1]. На первых этапах реализации программы за счет цифровизации закупок решались задачи организации электронного взаимодействия заказчиков и поставщиков, обеспечивалось ускорение закупочных процедур, снижались барьеры для выхода предпринимателей на рынок госзаказа, повышались конкуренция и степень публичности торгов, снижалась коррупционная составляющая. В последние несколько лет развитие информационных технологий в сфере управления регулируемыми закупками сталкивается с новыми вызовами, что отражается в приоритетах развития отрасли в период с 2025 по 2030 годы. По мнению авторов данного исследования, это связано с тенденциями, которые намечаются в целом в электронной коммерции. Так, в настоящее время показатели быстродействия и отказоустойчивости, возможность размещать и обрабаты-

вать значительные объемы данных, соблюдение их конфиденциальности уже не являются конкурентными преимуществами информационных систем: это обязательный набор, гарантирующий выживание на рынке. Сильными сторонами современных ИТ-решений становятся встроенные алгоритмы и сервисы, которые позволяют прогнозировать последствия принимаемых управленческих решений, при этом не требуют от пользователя специальных навыков программирования. Внедрение подобных разработок позволяет снизить риски и негативные последствия принимаемых решений для финансово-хозяйственной деятельности организации, минимизировать транзакционные издержки по операционным задачам, обеспечить устойчивое функционирование предприятия и достижение поставленных перед ним задач. Если говорить о сфере регулируемых закупок, то актуальными вызовами для нее последние три года являются проблемы эффективного «закрытия» торгов (успешного проведения процедуры с определением победителя и заключением с ним контракта), высокие риски расторжения контрактов, а также поддержание оптимального уровня конкуренции в закупках. «Незакрытие» процедур закупок, неявка поставщиков на торги часто связаны с невыгодными ценовыми и качественными

условиями контрактов, установленными заказчиками [2]. Риски расторжения, казалось бы, успешно заключенных контрактов, обусловлены не только форс-мажором на стороне поставщика при исполнении обязательств, как часто принято считать, но и переоценкой предпринимателями своих производственных возможностей и ресурсных ограничений при первоначальном планировании участия в конкретной закупке. Рассмотрим эту проблему на примере государственных и муниципальных закупок, где статистика наиболее точная. Согласно данным мониторинга Минфина России, в 2023 году было расторгнуто 323131 контрактов на общую сумму 708,5 млрд руб., что составляет 9,2% от общего количества и 5,9% от общей стоимости заключенных контрактов в 2023 году; в 2022 году количество расторгнутых контрактов составило 295072 шт., в процентах от количества и стоимости заключенных в 2022 году контрактов это также составило 9,2% и 5,9% соответственно [3]. По данным отчетов за 1 и 2 кварталы 2024 года, статистика расторжений незначительно улучшилась по количеству контрактов (стало меньше) и ухудшилась по стоимостным показателям (общая стоимость расторгнутых контрактов выросла [4]). Таким образом, значимых изменений по статистике расторжений выявлено не было. Что касается «конкуренции на торгах», то данный показатель в регулируемых закупках формально отвечает на вопросы о присутствии достаточного числа участников на товарных и отраслевых рынках, а также о наличии перекосов в сторону закупок у единственного поставщика (подрядчика, исполнителя), картельных сговоров и других антиконкурентных соглашений. Для более точной иллюстрации снова обратимся к статистике государственного и муниципального заказа. С 2022 года данный показатель также колеблется в пределах 2–3 заявки на одну процедуру против 4,2 – за период до пандемии, вызванной коронавирусом COVID-19 [5]. Минфин отмечает рост числа закупок у единственного поставщика и бьет тревогу из-за негативных тенденций в части конкуренции.

Анализируя все вышеперечисленное, довольно затруднительно определить, какая же проблема имеет более высокий приоритет. Низкая конкуренция из-за пассивности поставщиков, незнания ими условий и возможностей рынка, опасений не справиться, которая приводит к заключению контрактов с совсем слабыми игроками, единственным поставщиком, или высокие требования заказчиков, приводящие к отказу поставщиков в принципе вы-

ходить на рынок регулируемых закупок, и последующее «незакрытие» торгов? В такой ситуации кажется, что есть дисбаланс между целями, которые преследуют заказчики и поставщики на рынке госзаказа и информацией, которой они располагают. Это подтверждается масштабным исследованием коллектива НИУ ВШЭ, который отмечает «несоответствие между критериями эффективности закупок, которыми в своей текущей деятельности руководствуются заказчики и поставщики, и теми целями, на которых в настоящее время сфокусирована система регулирования закупок» [6]. Заказчики стремятся продемонстрировать любой ценой высокую конкуренцию на их закупках, достигнутую экономию, минимальное количество расторжений контрактов, тогда как поставщики ориентированы на минимальную конкуренцию и экономию, но солидарны с заказчиками в вопросах расторжения контрактов: хотят выполнить их без негативных для себя последствий. Значимость сферы регулируемых закупок для экономики страны обуславливает потребность в поддержании баланса интересов участников этого рынка, согласованности их действий, главным образом, по мнению авторов, за счет повышения их информированности. Решение задачи информированности сторон закупочного процесса о характере, состоянии рынка, перспективах и целесообразности проведения процедур закупок или участия в них в конкретное время, в конкретном регионе и при иных определенных условиях должно быть релевантным современному уровню развития технологий. Одним из возможных решений данной проблемы в условиях активной цифровизации может быть внедрение *рекомендательных предиктивных систем*, которые будут стимулировать поставщиков к участию в тендерах, позволят подбирать соответствующие их масштабам, опыту, ресурсообеспеченности закупочные процедуры для успешного участия. Для заказчиков развитие на рынке подобных предиктивных сервисов имеет множество плюсов: на их процедуры будут заявляться те контрагенты, которые имеют потенциал для исполнения контрактов, будет обеспечен не номинальный, а реальный уровень конкуренции среди достойных игроков рынка, а, значит, риски недобросовестного исполнения или расторжения существенно снизятся.

Таким образом, цель данного исследования – обосновать применение конкретного класса рекомендательных (предиктивных) систем для повышения эффективности участия предпринимателей

в регулируемых закупках и продемонстрировать работу сервиса на примере отдельной отрасли/сферы. Чтобы обосновать новизну такого подхода, обратимся к некоторым теоретическим аспектам вопроса.

### **1. Методология разработки и внедрения рекомендательных сервисов для сферы регулируемых закупок**

Рекомендательная система (recommender system (RecSys)) – это алгоритм, подбирающий и предлагающий пользователю релевантный контент на основе имеющейся информации о контенте, о пользователе, его поведении, а также о поведении других пользователей и о действиях пользователей по отношению к контенту [7].

Рекомендательные системы играют всё более важную роль в современном мире информации и коммерции. С постоянным увеличением объема данных и контента, доступного для пользователей, становится всё сложнее сориентироваться и найти персонализированную информацию. Рекомендательные системы способны решить вышеперечисленные проблемы: благодаря анализу предпочтений пользователей и контекста, они способны предоставить персонализированные рекомендации, соответствующие интересам и потребностям пользователей.

Возникает вопрос, а чем же тогда отличаются системы поддержки принятия решений, уже известные науке и практике, от рекомендательных систем? Основы систем поддержки принятия решений (моделирование предпочтений, принятие решений в условиях неопределенности) [8–10], нашли частичное применение в современных алгоритмах рекомендательных систем, но при этом некоторые важные аспекты (например, психологические и когнитивные), как правило, остаются за рамками. Дело в том (и это важно подчеркнуть), что системы поддержки принятия решений и рекомендательные системы создаются с разными целями. Рекомендательная система ориентирована на предсказание того, какой контент может быть интересен пользователю, основываясь на его прошлом поведении, предпочтениях и действиях других пользователей, добиваясь персонализации предложений за счет использования различных алгоритмов обработки данных и выявления скрытых закономерностей, зачастую с отсутстви-

ем обоснования конкретного выбора. Классическая система поддержки принятия решений же, в свою очередь, создана для того, чтобы помочь пользователю принять осознанное и обоснованное решение в условиях неопределенности. При этом дается обоснование того, почему та или иная альтернатива лучше прочих.

В последние годы наблюдается взрывной рост интереса разработчиков и пользователей именно к рекомендательным системам в различных областях, включая электронную коммерцию, социальные сети, музыку, фильмы, новости и многое другое. Отчасти это можно связать и с тем, как изменилась теория выбора: долгие годы экономисты говорили о «рациональном выборе», когда поведение потребителя было измеримым. Мерами эффективности принимаемых решений выступали, нередко, бюджетные ограничения. Развитие «иррациональной теории выбора» и работы Р. Талера [11], да и в целом интерес к поведенческой экономике привело к популяризации эмоциональной, социальной, личностной составляющих при принятии решений, совершении покупок, продаж и т.д. Стало очевидно: именно благодаря рекомендациям пользователи получают персонализированный контент, который соответствует их индивидуальным интересам, что существенно повышает удобство использования большинства ИТ-сервисов.

Что касается такой специфичной области, как регулируемые закупки, то в идеале система формирования рекомендаций должна работать следующим образом: поставщику с определенной регулярностью предлагается перечень наиболее релевантных для них процедур, в которых, как ожидается, он примет участие. При этом рекомендация может поступать через разные каналы коммуникации: уведомления в личном кабинете пользователя, email-рассылку, уведомления через мессенджеры и т.д.

В информационном поле известны несколько попыток разработки и внедрения рекомендательных систем в сфере закупок как на российском, так и на зарубежном рынке [12–14], однако они имеют ряд ограничений.

Предлагаемые в работах по развитию рекомендательных сервисов основные подходы можно разделить на пять групп [15–17], и рассмотреть через призму закупок.

1. Контентная фильтрация (content-based filtering) – алгоритм анализирует характеристики элементов, с которыми уже «работал» пользователь, и предлагает ему похожие. В контексте системы закупок это может означать, например, то, что поставщику будут предлагаться те процедуры, заказчик которых находится в одном из тех регионов, где поставщик уже работал.

2. Коллаборативная фильтрация (collaborative filtering) – алгоритм анализирует историю действий пользователей и ищет среди них группы со схожими предпочтениями, чтобы предлагать новым пользователям именно то, что понравилось другим: эта система основывается на истории взаимодействия пользователей с элементами. В контексте системы закупок это может означать, что будут сформированы пулы похожих поставщиков, например, по принципу работы в одном регионе и в рамках одной сферы. Тогда, если поставщик *A* принял участие в какой-то процедуре, то поставщику *B* из этого же пула можно рекомендовать поучаствовать в этой же процедуре.

3. Рекомендации на основе популярности (popularity-based) – алгоритм рекомендует элементы, которые пользуются наибольшей популярностью среди пользователей. Этот подход можно усложнить – поделить пользователей на кластеры и определять наиболее популярные элементы по ним. Наиболее целесообразно использовать эту технологию в ситуации, когда нет достаточного количества данных о конкретном пользователе. В контексте системы закупок, мы можем рекомендовать, например, такие процедуры, которые относятся к наиболее популярным сферам по классификатору ОКПД<sup>1</sup>.

4. Рекомендации на основе знаний о предметной области (knowledge-based) – алгоритм предлагает пользователю элементы, по тому или иному принципу связанные с теми, которыми он уже интересовался. Поскольку в данном исследовании авторы отталкиваются, прежде всего, от потребностей поставщика, данный подход является слабо применимым. Тем не менее, для заказчика его реализация могла бы выглядеть следующим образом: заказчик *A* провел закупку лазерных принтеров, и после этого система предлагает ему провести еще закупку бумаги А4 и подбирает список подходящих для этого поставщиков.

5. Гибридные системы (hybrid systems) предлагают комбинацию нескольких перечисленных подходов между собой (в основном это контентная и коллаборативная фильтрации) для предоставления наиболее персонализированных рекомендаций.

Авторы статьи видят цели рекомендательной системы в сфере закупок прежде всего в расширении аудитории участников закупок, повышении их активности на торгах и в обеспечении за счет этого роста конкуренции и снижения количества несостоявшихся закупок. Проблеме несостоявшихся процедур на торгах авторы уже посвятили ряд своих работ [18, 19] и считают её одной из ключевых в контексте эффективности закупочной деятельности. В связи с этим использовать подход (3) – рекомендации на основе популярности – нецелесообразно, поскольку таким образом поставщикам будут рекомендованы процедуры с уже высоким уровнем конкуренции. Кроме того, процесс закупок очень четко связан со временем – возможность подавать заявки и участвовать в торгах длится в среднем 1–2 недели. Рекомендации также должны формироваться с соответствующей периодичностью. Соответственно, если для генерации рекомендаций отталкиваться от уже свершившегося факта участия других поставщиков, то велика вероятность, что новый поставщик на эту процедуру просто не успеет, так как процедура уже станет неактуальной. В связи с этим можно заключить, что в данном случае наиболее подходящим методом для формирования рекомендательной системы в сфере закупок является *контентная фильтрация*. Опираясь на этот тезис, необходимо обосновать новизну подхода: до настоящего времени масштабно рекомендательные системы в сфере государственных закупок не использовались, оставаясь исключительно прерогативой электронной коммерции и B2B сервисов.

## 2. Принципы подбора исходных данных для формирования рекомендаций

Взрывной рост интереса к рекомендательным сервисам обусловлен тем, что практически все процедуры по госзакупкам сегодня проводятся в электронной форме. Обеспечивают проведение

<sup>1</sup> Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности

электронных торгов электронные торговые площадки (ЭТП). Для развития своего тезиса авторами среди всех площадок были отобраны «федеральные операторы торгов», которые имеют право проводить закупки госзаказчиков по 44-ФЗ: Сбербанк АСТ, РТС-Тендер, Национальная электронная площадка (Фабрикант), ЭТП ГПБ (Газпромбанк), АГЗ РТ, АО «ЕЭТП» (Росэлторг), Российский аукционный дом (ЭТП РАД), ТЭК-Торг [20]. К этой группе можно отнести еще одну площадку – ЭТП АСТ ГОЗ, на ней проводятся торги государственного оборонного заказа.

Информационную базу исследования составляют данные об активности поставщиков на площадке АО ЕЭТП (Росэлторг) с 2020 года (историческая выборка) с учетом открытых данных, размещенных в ЕИС<sup>2</sup>. Обучение модели строилось на данных об участиях с 2020 года, разделенных на двухнедельные интервалы (в соответствии со средней продолжительностью сбора заявок на торги). Тестирование модели проводилось за период октябрь–декабрь 2023 года. Были рассмотрены только электронные закупки, то есть те, извещения о проведении которых были опубликованы. При этом для тестирования и отработки была выбрана конкретная отрасль: энергетическая сфера. Таким образом, хотя бы один товар, который закупал заказчик в тестируемой процедуре, входил в группу ОКПД2 27 «Оборудование электрическое». Выбор товаров для электроэнергетики был обусловлен их высокой значимостью для жизнеобеспечения заказчиков. Также были составлены «профили» поставщиков на основе их предпочтений по историческим данным. Интерес для авторов представляли следующие аспекты: характеристики поставщика, в том числе, в каких сферах деятельности он занят (согласно классификатору ОКПД2), где (в каких регионах и на каких площадках), по какой нормативной базе (в соответствии с какими федеральными законами проводятся закупки) и с кем поставщик взаимодействует.

В качестве заказчиков рассматривались несколько типов организаций:

- ♦ органы власти, учреждения бюджетной сети, расходующие бюджетные средства в соответствии с федеральным законом № 44-ФЗ от 05.04.2013 «О

контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд»;

- ♦ компании с государственным и муниципальным участием (такие как ПАО «Газпром», ПАО «Сбербанк», ПАО «ВТБ» и т.д.), а также государственные и муниципальные унитарные предприятия, действующие на основе федерального закона № 223-ФЗ от 18.07.2011 «О закупках отдельных видов юридических лиц»;
- ♦ коммерческие заказчики, проведение закупок которых определяется только Гражданским кодексом РФ и правилами, установленными заказчиками.

Если необходимость сбора и обработки формальных характеристик для профиля поставщика (регион, основная сфера деятельности и прочие) была очевидна в контексте формирования рекомендаций, то вопрос с оценкой взаимодействия в парах «конкретный заказчик – конкретный поставщик» недостаточно изучен. Это связано с тем, что информация об участии компаний в тендерах с 2022 года не предназначена для публикации в открытых источниках, что существенно усложняет выявление предпочтений и моделей поведения в парах заказчик-поставщик. Между тем, опираясь на свой экспертный опыт в отрасли закупок, авторы исследования предположили, что неэкономические отношения между заказчиками и поставщиками (дружеские, родственные, национальные, религиозные, политические и другие) также могут влиять на предпочтения поставщиков.

Для проверки такого аспекта, авторы попробовали удостовериться в том, что связь между заказчиками и поставщиками действительно имеет место: в *таблице 1* представлена оценка частоты взаимодействия конкретных заказчиков с конкретными поставщиками в 2022 и 2023 годах. Даже без учета более узкоспециализированных сфер деятельности (детальных кодов ОКПД2), доля устойчивых взаимодействий значительная, особенно на фоне сокращения количества заказчиков (согласно данным из открытых источников (ЕИС в сфере закупок) на примере площадки Росэлторг), в 2023 году по сравнению с 2020 их количество сократилось на 35%).

<sup>2</sup> Единая информационная система в сфере закупок, <https://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html>

Таблица 1.

## Оценка взаимодействия поставщиков и заказчиков в рамках группы ОКПД2 27

Показатель	2022	2023
Доля постоянных пар «заказчик-поставщик», которые уже выявлялись ранее (начиная с 2020 года) на площадке Росэлторг, среди всех сформированных пар за год, %	19,9	21,1
Отношение количества постоянных пар «заказчик-поставщик», которые уже выявлялись ранее (начиная с 2020 года) на примере площадки Росэлторг, к количеству уникальных заказчиков, проявивших активность в течение соответствующего года, %	0,89	0,96
Средний уровень конкуренции на торгах (среднее количество заявок на одну процедуру (лот)), %	2,05	2,01

С учетом вышеперечисленного, алгоритм формирования рекомендаций был составлен из следующих шагов:

1. Формирование базового профиля каждого поставщика<sup>3</sup> – статистическая оценка его предпочтений.
2. Сбор информации о всех релевантных опубликованных процедурах за последние две недели.
3. Предварительная фильтрация процедур по ценовым категориям. Сегодня в работе крупных федеральных операторов торгов по госзакупкам устоялась практика сегментации торгов в зависимости от начальной (максимальной) цены контракта [3]. В зависимости от ценового сегмента, в котором проводится закупка, и в котором работает поставщик, закупочная процедура рекомендуется или не рекомендуется предпринимателю-потенциальному участнику торгов. Обычно выделяют 12 сегментов: «до 100 тыс. рублей», «от 100 до 500 тыс. рублей» и т.д. до сегмента «от 100 млн рублей», а также отдельный случай, когда цена не определена. Эмпирически было установлено, что поставщику нецелесообразно рекомендовать процедуры, цена которых не попадает в его ценовую категорию или ближайшие соседние. Соблюдение данного правила важно, так как у участника закупки попросту может не быть нужных ресурсов для участия в тендере, а, при выигрыше – для исполнения контракта.
4. Расчет значений признаков, на основе которых формируются рекомендации, по формуле (1):

$$x_i = \frac{\bar{x}_i \cdot n}{N}, \quad (1)$$

где  $\bar{x}_i$  – средняя доля данного признака в истории поставщика;

$n$  – количество уникальных совпадений признака с историей поставщика;

$N$  – общее количество уникальных значений признака в процедуре.

5. Расчет взвешенной суммы всех признаков процедуры. Вес определяет важность каждого признака в итоговой оценке, их определение – отдельная задача, непосредственно влияющая на качество предсказания.

6. Ранжирование процедур по взвешенным суммам значений признаков. Чем выше значение – тем больше эта процедура подходит для конкретного поставщика. Поставщику рекомендуются 10 процедур с максимальным значением взвешенной суммы всех признаков процедуры.

Далее алгоритм был реализован на языке Python преимущественно с использованием библиотек numpy, и, отчасти, sklearn, catboost, pytorch.

### 3. Разработка и тестирование прототипа рекомендательной системы

Приведем итоговый список факторов, на основе которых оказалось целесообразным ранжирование рекомендация для конкретного поставщика:

<sup>3</sup> В контексте поставленной задачи здесь анализируются только те поставщики, кто хотя бы раз участвовал в процедурах на закупку товаров по ОКПД2 27.

- ◆ наличие условия о том, что закупка предназначена для субъектов малого и среднего предпринимательства;
- ◆ заказчик;
- ◆ факт хотя бы одной победы поставщика у данного заказчика;
- ◆ регион заказчика;
- ◆ факт хотя бы одной победы поставщика в регионе заказчика;
- ◆ нормативная база (44-ФЗ, 223-ФЗ, коммерческая закупка);
- ◆ факт хотя бы одной победы поставщика в рамках соответствующей нормативной базы;
- ◆ сфера деятельности (по полному коду ОКПД);
- ◆ факт хотя бы одной победы в рамках соответствующей сферы деятельности (по полному коду ОКПД);
- ◆ склейка сферы деятельности и региона заказчика (интерпретируется как участия поставщика в соответствующем регионе в тендере в конкретной сфере и, аналогично, факт хотя бы одной победы);
- ◆ склейка сферы деятельности и заказчика (интерпретируется как участия поставщика в тендере от соответствующего заказчика в конкретной сфере и, аналогично, факт хотя бы одной победы);
- ◆ склейка сферы деятельности и региона заказчика (интерпретируется как участия поставщика в соответствующем регионе в тендере в конкретной сфере и, аналогично, факт хотя бы одной победы);
- ◆ склейка сферы деятельности и площадки, на которой опубликовано извещение (интерпретируется как участия поставщика в тендере на соответствующей площадке в конкретной сфере и, аналогично, факт хотя бы одной победы).

Важно было также и оценить качество модели. Основная метрика качества модели контентной фильтрации в данном случае – *recall at K* ( $r@K$ ), то есть чувствительность (полнота) на  $K$  элементах [9]. Авторы посчитали «позитивным прогнозом» такой исход, когда поставщик принял участие в конкретной процедуре из 10 рекомендованных ( $r@10$ ). Ис-

пользуя в качестве целевой метрики именно чувствительность, коллектив стремился к увеличению количества реальных рекомендаций разным поставщикам. При этом эти 10 процедур были определены путем ранжирования по наибольшей вероятности участия для конкретного поставщика. С точки зрения бизнес-логики, наиболее важной в рекомендованном списке процедур оказывалась самая первая процедура – именно её пользователь вероятнее всего мог просмотреть в большинстве случаев.

Определение весов признаков имеет ключевую роль при расчете рейтинга. В данных для обучения есть сведения о факте участия поставщиков в потенциально интересных (предварительно отфильтрованных) процедурах: «1» – принял участие, «0» – обратный случай. Задача алгоритма ранжирования – упорядочить процедуры для конкретного поставщика таким образом, чтобы среди первых 10 вероятность участия была максимальной. Иными словами, оценивается, в каких процедурах из 10 первых рекомендованных поставщик действительно принял участие, и затем рассчитывается  $r@10$ . Для расчета рейтинга было использовано два подхода:

- ◆ моделирование вероятности участия конкретного поставщика в конкретной процедуре и ранжирование по полученным оценкам вероятности;
- ◆ ранжирование по взвешенной сумме значений  $x_i$ , причем методы определения весов могут быть разные.

В базовом варианте, при построении модели дерева решений с помощью *sklearn*, значение  $r@10$  составляет  $0,21^4$ .

С использованием базовой модели были проведены следующие эксперименты:

- 1) расчет взвешенной суммы, метод получения весов – последовательное исключение каждого признака для выявления наиболее значимых и выставление весов в соответствии с последующим изменением ключевой метрики ( $r@10 = 0,23$ );
- 2) аналогично первому пункту, но исходные значения признаков были предварительно нормированы ( $r@10 = 0,25$ );

<sup>4</sup> Здесь и далее подобные оценки были получены на обучающей выборке с перекрестной проверкой  $k = 5$ .

3) расчет взвешенной суммы, метод получения весов – байесовская оптимизация, целевая метрика – вероятность участия в первых десяти процедурах ( $r@10 = 0,22$ ).

Значительного изменения метрики не наблюдалось, а наилучший исход давал вариант (2). Далее были проведены эксперименты с различными моделями классификации для улучшения метрики:

- 1) случайный лес (sklearn [21]),  $r@10 = 0,306$ ;
- 2) градиентный бустинг на деревьях решений (catboost [22]),  $r@10 = 0,331$ ;
- 3) полносвязная нейросеть с одним скрытым слоем, построенная на PyTorch [23],  $r@10 = 0,355$ .

Алгоритм случайного леса (Random Forest) – это ансамблевый метод на основе множества деревьев решений. Каждое дерево строится на случайной подвыборке обучающих данных (с повторениями), и используется случайный набор признаков на каждом узле для разделения. Градиентный бустинг на деревьях решений (Gradient Boosting Decision Trees, GBDT) – это модификация алгоритма, в которой деревья строятся одно за другим, каждое новое дерево корректирует ошибки предыдущего [24].

На *рисунке 1* представлена иллюстрация нейросети, построенной в рамках пункта (3). Для наглядности число входов было принято равным трем. Скрытый слой предназначен для выделения наиболее значимых признаков. В качестве функции активации использована ReLU (Rectified Linear Unit). Количество нейронов в скрытом слое

может быть произвольным, здесь их количество по итогам экспериментов было принято равным 10. Функция активации выходного слоя – сигмоида (логистическая функция), возвращает число в диапазоне от 0 до 1.

Нейросеть обучалась с использованием функции потерь Focal Loss. Это модификация функции перекрестной энтропии, обычно используется в задачах с сильно несбалансированными классами, снижая вес для легко классифицируемых [25]. Для каждого батча (партии данных) эта функция была рассчитана по формуле (2).

$$\text{FocalLoss} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i (1 - p_i)^\gamma \log(p_i), \quad (2)$$

где  $N$  – число примеров в батче;

$\alpha_i$  – весовой коэффициент для правильного класса;

$p_i$  – предсказанная вероятность правильного класса;

$\gamma$  – параметр фокусировки.

Относительно невысокие значения метрики объясняются специфической сферой деятельности: поскольку в деятельности электронной торговой площадки интересны, прежде всего осуществленные участия, то по среднему уровню конкуренции можно оценить, что типичный поставщик взаимодействует с «контентом» примерно 2 раза в год. Приведем сравнение с сервисом Netflix в США: известно, что в 2019 году в его каталоге было 47000 эпизодов сериалов и 4000 фильмов [26], а количество подписчиков во втором квартале было равно 60,1 млн человек

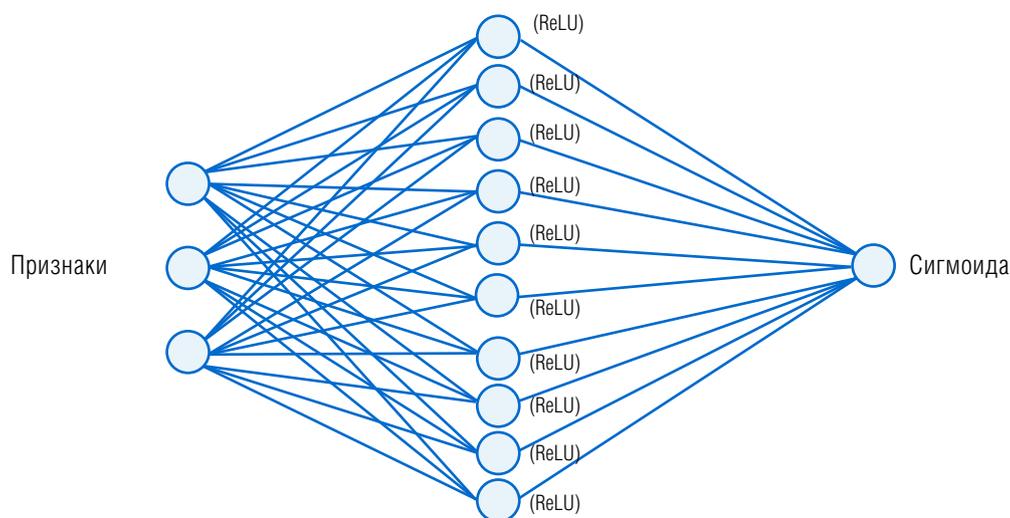


Рис. 1. Архитектура полносвязной нейронной сети для прогнозирования участия поставщиков.

[27]. В 2024 году было доступно около 7000 фильмов и телешоу [28] (точное количество серий сериала не разглашалось, но в 2024 году было добавлено более 10000 новых серий [29]) для 90 миллионов подписчиков (США и Канада) [30]. При этом неизвестно, сколько «запросов» в среднем за год делает пользователь, но можно предположить, что по крайней мере одно (в реальности это число, вероятно все-го, значительно больше). Даже при такой приблизительной оценке среднее количество взаимодействий с контентом составляет 118 раз в год. Здесь необходимо подчеркнуть, что поведение пользователей на рынке закупок имеет свою особенность, которая довольно сильно отличается от стандартных сфер применения рекомендательных систем. Распределение активности среди поставщиков – неравномерное – в рамках некоторых категорий ОКПД2 количество участий в год может превышать 1000, а в иных – единицы. Вместе с тем, как факт «активности» в закупках можно рассматривать любые действия поставщика на странице процедуры (просмотры, скачивания документации к процедуре и т.п.).

Как было подтверждено в ходе экспериментов, чем больше пул закупок, потенциально подходящих поставщику, тем сложнее релевантным процедурам попасть в топ-10. В среднем поставщику действительно может подходить довольно много процедур, поэтому сложность ранжирования возрастает. И вот здесь решающим фактором оказывается как раз регулярность взаимодействия между поставщиками и заказчиками (те самые поведенческие аспекты, упомянутые в начале работе).

Тем не менее, было получено обоснование пользы от внедрения рекомендательной системы в работу площадки в рамках А/В тестирования. Для этого были выделены две группы (А и В) поставщиков, работающих на площадке по ОКПД2 27, примерно одинакового объема. Тестирование проводилось на 10 недельных интервалах в конце 2023 года, в рамках теста поставщикам рассылались письма на электронные адреса. Необходимо было, чтобы состав этих групп был однородный, поэтому они были подобраны так, чтобы в каждой была примерно одинаковая доля активных и неактивных клиентов и примерно одинаковая доля по предпочитаемым ценовым категориям закупок. Также необходимо было, чтобы средняя частота открытия писем с рассылаемыми до эксперимента «наивными» рекомендациями была бы значимо не различима (фактически разница составила не более 2%), а сами группы

были практически одинаковыми по количеству. По каждому письму считалось количество просмотров этого письма и количество переходов из письма на электронную площадку для просмотра информации о закупке. На интервалах 6–9 (рис. 2) поставщикам из группы А осуществлялась рассылка рекомендаций по описанной методологии: каждые две недели по электронной почте высылался список из 10 процедур, рекомендованных каждому для участия. В остальное время рассылка также осуществлялась, но рекомендации формировались «наивным» образом: поставщику предлагались случайные 10 закупок, которые были объявлены в его регионе, с профилями деятельности, в которых он уже работал, и в ценовых категориях, которые ему подходили.

Результаты представлены на рисунках 2 и 3.

Таким образом, можно заключить, что рекомендательные рассылки воспринимались клиентами позитивно и с интересом, стимулировали их к дополнительным действиям, способствовали их информированию. За счет этого были получены положительные эффекты для конкурентной среды на торгах.

#### 4. Результаты и обсуждения

Предложенные разработки уже частично внедрены в работу оператора торгов АО «ЕЭТП» (Росэлторг), что обеспечило увеличение количество успешно завершенных процедур на 3,7% [31], а в целом заказчики на 40% улучшили результативность поиска поставщиков. Конечно же, это работает и в обратную сторону: если заказчики чаще находят

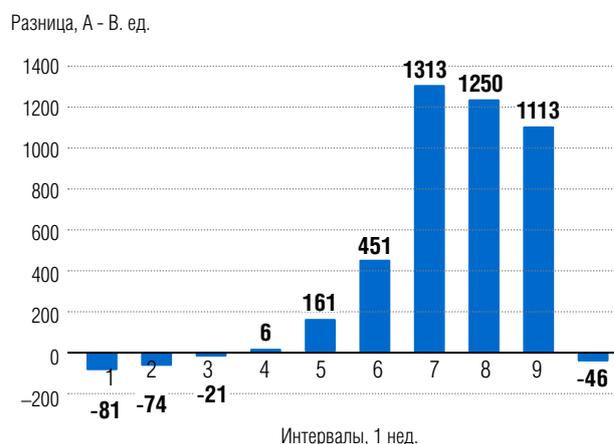


Рис. 2. Разница между количеством просмотров письма с рекомендациями по группе А с аналогичным показателем по группе В.

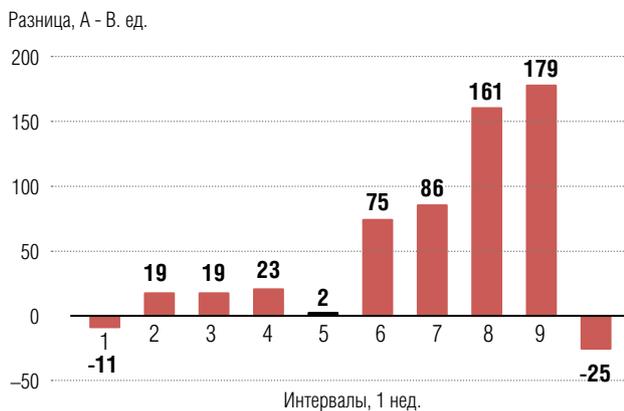


Рис. 3. Разница между количеством переходов на площадку из письма с рекомендациями по группе А с аналогичным показателем по группе В.

себе исполнителей по контрактам и договорам, то и предприниматели с большей вероятностью открывают релевантные для себя новые рынки сбыта, реже сталкиваются с проблемами расторжения контрактов. Однако, несмотря на положительный опыт и оптимистичные перспективы, авторы отмечают и риски внедрения рекомендательных сервисов. Так, при росте количества параметров, на основе которых строятся рекомендации, есть риск увеличить «зашумленность модели». То есть, не выявив приоритетную группу параметров, благодаря которым и формируется наиболее точная рекомендация, разработчики могут тратить существенные усилия времени и вычислительные мощности на сбор, обработку, хранение второстепенных характеристик. Избежать таких рисков поможет привлечение отраслевых экспертов, которые смогут скорректировать содержательную часть разработки. Вторая группа рисков связана с переобучением системы, что может происходить из-за дисбаланса в исходных данных (например, из-за популярности ряда категорий классификатора ОКПД2), чрезмерной сложности модели (тогда алгоритм будет «запоминать» отдельные предпочтения наиболее активных клиентов вместо того, чтобы выделить общие признаки).

Нельзя не отметить также риски «человеческого фактора» — ошибки при проведении А/В тестов, что усугубляется высокой чувствительностью такой системы к ошибке; дороговизну и сложность технического сопровождения и кадрового обеспечения подобного рода разработок.

## Заключение

Таким образом, в результате проведенного исследования авторский коллектив выполнил следующие задачи:

- ♦ сформировал гипотезу о целесообразности использования рекомендательных систем для повышения эффективности государственных, муниципальных и корпоративных закупок (регулируемых закупок);
- ♦ исследовал типологии систем и обосновал выбор конкретного класса систем, наиболее релевантного для выработки рекомендаций для участников рынка регулируемых закупок;
- ♦ разработал прототип рекомендательной системы, для чего обосновал методологию его построения и структуру данных для его наполнения;
- ♦ провел тестирование прототипа на закупках для электроэнергетической отрасли путем рассылки рекомендаций принять участие в конкретных торгах предпринимателям, которые потенциально могли бы, в силу своего рыночного положения и победить в процедуре, и эффективно выполнить контракт.

Проведенное исследование позволило, во-первых, расширить проблематику оценки и повышения эффективности регулируемых закупок. В настоящее время эффективность в этой области определяется уровнем конкуренции (количество заявок на 1 процедуру) и полученной экономией (насколько дешевле от первоначальной заявленной цены удалось закупиться). Однако качественные показатели, такие как личные предпочтения участников закупок, факторы выбора тех или иных процедур или заказчиков оставались малоизученными. Персонализированные рекомендации позволяют лучше исследовать настроения и возможности участников рынка, повышать результативность торгов.

Во-вторых, по итогам исследования получены значимые для науки и практики результаты. В частности, разработана методология построения рекомендательных сервисов для государственных нужд, а не для решения чисто коммерческих задач. В дальнейшем такая методология может быть тиражирована и на другие области, где государство является контрагентом. Что касается практики, то планируется превращение прототипа в полноценную систему и последующее полное внедрение в работу оператора торгов.

Дальнейшие направления исследований, по мнению авторов, могут носить более прикладной характер, ориентированный на настройку рекомендательных сервисов под особенности конкретных отраслей, а также изучение возможностей других классов рекомендательных систем. ■

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-28-01644).

### Литература

1. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. №320 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Управление государственными финансами и регулирование финансовых рынков» (с изменениями и дополнениями) // Система «Гарант». [Электронный ресурс]: <https://base.garant.ru/70644234> (дата обращения 07.10.2024).
2. Денисова А.И., Созаева Д.А., Гончар К.В., Александров Г.А. Анализ факторов незакрытия торгов по госзакупкам лекарственных препаратов // Проблемы прогнозирования. 2024. № 2. С. 178–191. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-203-178-191>
3. Сводный аналитический отчет о результатах мониторинга закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, а также закупок товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц за 2023 г. // Минфин России, 2024. [Электронный ресурс]: [https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/05/main/Svodnyu\\_2023.pdf](https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/05/main/Svodnyu_2023.pdf) (дата обращения 07.10.2024).
4. Ежеквартальный отчет по результатам мониторинга закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, а также закупок товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц за II квартал 2024 г. // Минфин России, 2024. [Электронный ресурс]: [https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/07/main/II\\_kvartal\\_2024\\_g.pdf](https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/07/main/II_kvartal_2024_g.pdf) (дата обращения 07.10.2024).
5. Кузнецов М. Что ожидает рынок госзакупок в 2024 году // Российская газета – Экономика Центрального округа. 2024. № 4(9246). [Электронный ресурс]: <https://rg.ru/2024/01/11/reg-cfo/delo-za-malym.html> (дата обращения 07.10.2024).
6. Яковлев А.А., Балаева О.Н., Родионова Ю.Д., Ткаченко А.В. Проблемы и эффективность госзакупок глазами их участников // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2020. № 11. С. 83–103. <https://doi.org/10.30680/ЕСО0131-7652-2020-11-83-103>
7. Фальк К. Рекомендательные системы на практике. М.: ДМК Пресс, 2020.
8. Баранов В.В. Процессы принятия управляющих решений, мотивированных интересами. М.: Физматлит, 2005.
9. Кравченко Т.К., Исаев Д.В. Системы поддержки принятия решений: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. изд. М.: Юрайт, 2024.
10. Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Пер. с англ. / Под ред. И.Ф. Шахнова. М.: Радио и связь, 1981.
11. Талер Р. Новая поведенческая экономика. Почему люди нарушают правила традиционной экономики. М.: Эксмо, 2022.
12. García Rodríguez M.J., Montequín V., Ortega-Fernández F., Balsera J. Bidders recommender for public procurement auctions using machine learning: data analysis, algorithm, and case study with tenders from Spain // Complexity. 2020. Article 8858258. <https://doi.org/10.1155/2020/8858258>
13. Hickok M. Public procurement of artificial intelligence systems: new risks and future proofing // AI & Society. 2024. Vol. 39. P. 1213–1227. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01572-2>
14. Разработка и исследование моделей многоклассовых классификаторов для рекомендательной системы подготовки заявок на портале единой информационной системы в сфере закупок / Я.А. Селиверстов и [др.] // Информатика, телекоммуникации и управление. 2022. Т. 15. № 2. С. 43–62. <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15204>
15. Bias and debias in recommender system: A survey and future directions / Chen J. [et al.] // ACM Transactions on Information Systems. 2023. Vol. 41. No. 3. Article 67. <https://doi.org/10.1145/3564284>
16. Ko H., Lee S., Park Y., Choi A. A survey of recommendation systems: Recommendation models, techniques, and application fields // Electronics. 2022. Vol. 11. No. 1. Article 141. <https://doi.org/10.3390/electronics11010141>
17. Андриянов Н.А., Атаходжаева М.Р., Бородин Е.И. Математическое моделирование рекомендательной системы и обработка данных телекоммуникационной компании с помощью моделей машинного обучения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22. № 2. С. 17–28. <https://doi.org/10.14529/ctcr220202>
18. Денисова А.И., Созаева Д.А., Гончар К.В., Александров Г.А. Совершенствование методологии оценки экономической эффективности государственных закупок лекарственных средств // Финансовый журнал. 2023. Т. 15. № 4. С. 63–81. <https://doi.org/10.31107/2075-1990-2023-4-63-81>
19. Денисова А.И., Созаева Д.А., Гончар К.В., Александров Г.А. Анализ факторов незакрытия торгов по госзакупкам лекарственных препаратов // Проблемы прогнозирования. 2024. № 2. С. 178–191. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-203-178-191>

20. Постановление Правительства РФ от 08.06.2018 N 656 (ред. от 23.12.2024) «О требованиях к операторам электронных площадок, операторам специализированных электронных площадок, электронным площадкам, специализированным электронным площадкам и функционированию электронных площадок, специализированных электронных площадок, подтверждении соответствия таким требованиям, об утрате юридическим лицом статуса оператора электронной площадки, оператора специализированной электронной площадки» // КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_300361/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_300361/) (дата обращения 07.10.2024).
21. RandomForestClassifier // scikit-learn: Machine Learning in Python. [Электронный ресурс]: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (дата обращения 11.02.2025).
22. CatBoostClassifier // CatBoost library. [Электронный ресурс]: [https://catboost.ai/docs/en/concepts/python-reference\\_catboostclassifier](https://catboost.ai/docs/en/concepts/python-reference_catboostclassifier) (дата обращения 11.02.2025).
23. torch.nn // PyTorch [Электронный ресурс]: <https://pytorch.org/docs/stable/nn.html> (дата обращения 11.02.2025)
24. Ансамблевые методы: Градиентный бустинг, случайные леса, бэггинг, метод голосования, стекинг // scikit-learn: Машинное обучение в Python. [Электронный ресурс]: <https://scikit-learn.ru/stable/modules/ensemble.html> (дата обращения 11.02.2025).
25. Lin T.-Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. Focal loss for dense object detection // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy. 2017. P. 2999–3007. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324>
26. Content available on Disney's new streaming service's (Disney+) compared to Netflix in the United States as of April 2019 // Statista. [Электронный ресурс]: <https://www.statista.com/statistics/1041104/disney-catalog-netflix-comparison-us/> (дата обращения 10.10.2024).
27. Сафронов А. Количество подписчиков Netflix в США упало впервые за 8 лет // РБК Инвестиции. 2019. [Электронный ресурс]: <https://quote.ru/news/article/5d3013649a794752c4a31fee> (дата обращения 10.10.2024).
28. Morley M. Netflix library by the numbers 2024: 589 new originals released and library swells to over 7,000 titles // What's on Netflix. 2025. [Электронный ресурс]: <https://www.whats-on-netflix.com/news/netflix-library-by-the-numbers-2024/> (дата обращения 10.05.2025).
29. Moore K. Netflix added over 10,000 episodes of TV in 2024 // What's on Netflix. 2025. [Электронный ресурс]: <https://www.whats-on-netflix.com/news/netflix-added-over-10000-episodes-of-tv-in-2024/> (дата обращения 10.05.2025).
30. Number of Netflix paying streaming subscribers worldwide as of 4th quarter 2024, by region // Statista. 2025. [Электронный ресурс]: <https://www.statista.com/statistics/483112/netflix-subscribers/> (дата обращения 10.05.2025).
31. Рекомендательная система в сфере электронных закупок // Альянс в сфере искусственного интеллекта. 2020. [Электронный ресурс]: <https://ai-russia.ru/library/roseltorg-system> (дата обращения 10.10.2024).

## Об авторах

### Денисова Анна Игоревна

кандидат экономических наук;

старший преподаватель, кафедра математических методов в экономике и управлении, Институт информационных систем, Государственный университет управления, Россия, 109542, г. Москва, Рязанский пр-т, 99;

E-mail: [a.i.denisova@inbox.ru](mailto:a.i.denisova@inbox.ru)

ORCID: 0000-0002-2296-237X

### Созаева Джамиля Алимовна

доктор экономических наук, доцент;

руководитель лаборатории, проектно-учебная лаборатория исследований и разработок в сфере цифровизации управления, Государственный университет управления, Россия, 109542, г. Москва, Рязанский пр-т, 99;

доцент, кафедра оценочной деятельности и корпоративных финансов, Университет «Синергия», Россия, 125190, г. Москва, Ленинградский пр-т, 80, корп. Г;

E-mail: [dasozaeva@gmail.com](mailto:dasozaeva@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-3955-891X

### Гончар Константин Валерьевич

младший научный сотрудник, проектно-учебная лаборатория исследований и разработок в сфере цифровизации управления; Государственный университет управления, Россия, 109542, г. Москва, Рязанский пр-т, 99;

старший преподаватель, кафедра ИУ-3, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5;

E-mail: [goncharkv@gmail.com](mailto:goncharkv@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7345-3340

# Development of recommendation systems to improve the efficiency of regulated procurement in the electric power industry

**Anna I. Denisova**<sup>a</sup>

E-mail: a.i.denisova@inbox.ru

**Dzhamilya A. Sozaeva**<sup>a,b</sup>

E-mail: dasozaeva@gmail.com

**Konstantin V. Gonchar**<sup>a,c</sup>

E-mail: goncharkv@gmail.com

<sup>a</sup> State University of Management, Moscow, Russia

<sup>b</sup> Synergy University, Moscow, Russia

<sup>c</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## Abstract

This article considers ways to improve the efficiency of the regulated procurement market by implementing recommender systems into the existing procurement IT infrastructure. Using state, municipal and commercial procurement of electric power products as an example, the article considers promising classes of recommender systems for implementation, proposes a methodology for developing such services, and discloses algorithms for processing, configuring and interpreting data necessary for their operation. The difference between the author's approach to creating services and previously published works is substantiated, testing and A/B testing are carried out, and an assessment of the effectiveness is presented. The results obtained have scientific novelty (the methodology of using neural networks in relation to the procurement industry has been substantiated) and practical significance (the customer's time saved on searching for suppliers by up to 40%; the pool of potential suppliers has been expanded; supplier risks have been diversified by selecting relevant procedures from new areas and from new customers; suppliers have been provided with the opportunity to find up to 2–3 new customers for 1 recommendation mailing with a frequency of 1–2 times a week). We proposed to implement the developments in the practice of the operator of public procurement tenders. The authors see further development of recommendation services and solutions for the procurement industry in improving the analysis of semantic (text, logical) content of procurement documents, as well as the behavioral strategies of suppliers. The risks and limitations are associated with the high cost of maintaining a staff of developers-practitioners in neural networks, possible hallucinations of neural networks and their high sensitivity to errors and original data sets.

**Keywords:** recommender systems, efficiency of regulated procurement, probability of winning in public procurement, personalized recommendations, “non-closing” of tenders, competition in procurement

**Citation:** Denisova A.I., Sozaeva D.A., Gonchar K.V. (2025) Development of recommendation systems to improve the efficiency of regulated procurement in the electric power industry. *Business Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 25–40. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.25.40

## References

1. Garant System (2014) *Resolution of the Government of the Russian Federation of April 15, 2014 No. 320 "On approval of the state program of the Russian Federation "Public Finance Management and Regulation of Financial Markets" (with amendments and additions)*. Available at: <https://base.garant.ru/70644234> (accessed 10 October 2024) (in Russian).
2. Denisova A.I., Sozaeva D.A., Gonchar K.V., Aleksandrov G.A. (2024) Analysis of factors for failure to close tenders for public procurement of drugs. *Problems of Forecasting*, no. 2, pp. 178–191 (in Russian). <https://doi.org/10.47711/0868-6351-203-178-191>
3. Ministry of Finance of Russia (2024) *Consolidated analytical report on the results of monitoring the procurement of goods, works, services to meet state and municipal needs, as well as the procurement of goods, works, services by certain types of legal entities for 2023*. Available at: [https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/05/main/Svodnyy\\_2023.pdf](https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/05/main/Svodnyy_2023.pdf) (accessed 10 October 2024) (in Russian).
4. Ministry of Finance of Russia (2024) *Quarterly report on the results of monitoring the procurement of goods, works, services to meet state and municipal needs, as well as the procurement of goods, works, services by certain types of legal entities for the second quarter of 2024*. Available at: [https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/07/main/II\\_kvartal\\_2024\\_g.pdf](https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2024/07/main/II_kvartal_2024_g.pdf) (accessed 10 October 2024) (in Russian).
5. Kuznetsov M. (2024) What awaits the public procurement market in 2024. *Rossiyskaya Gazeta – Economy of the Central District*, no. 4(9246). Available at: <https://rg.ru/2024/01/11/reg-cfo/delo-za-malym.html> (accessed 10 October 2024) (in Russian).
6. Yakovlev A.A., Balaeva O.N., Rodionova Yu.D., Tkachenko A.V. (2020) Problems and efficiency of public procurement through the eyes of their participants. *All-Russian economic journal ECO*, no. 11, pp. 83–103 (in Russian). <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2020-11-83-103>
7. Falk K. (2020) *Recommender systems in practice*. Moscow: DMK Press (in Russian).
8. Baranov V.V. (2005) *Processes of making management decisions motivated by interests*. Moscow: Fizmatlit (in Russian).
9. Kravchenko T.K., Isaev D.V. (2024) *Decision support systems: textbook and practical training for universities. 2nd edition, revised and additional edition*. Moscow: Yurait (in Russian).
10. Keeney R.L., Raiffa H. (1976) *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. John Wiley & Sons.
11. Thaler R. (2022) *New behavioral economics. Why people break the rules of traditional economics*. Moscow: Eksmo (in Russian).
12. García Rodríguez M.J., Montequín V., Ortega-Fernández F., Balsera J. (2020) Bidders recommender for public procurement auctions using machine learning: data analysis, algorithm, and case study with tenders from Spain. *Complexity*, article 8858258. <https://doi.org/10.1155/2020/8858258>
13. Hickok M. (2024) Public procurement of artificial intelligence systems: new risks and future proofing. *AI & Society*, vol. 39, pp. 1213–1227. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01572-2>
14. Seliverstov Y.A., Komissarov A.A., Lesovodskaya A.A., et al. (2022) Development and research of models of multi-class classifiers for a recommender system for preparing applications on the e-procurement. *Computing, Telecommunications and Control*, vol. 15, no. 2, pp. 43–62 (in Russian). <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15204>
15. Chen J., Dong H., Wang X., et al. (2023) Bias and debias in recommender system: A survey and future directions. *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 41, no. 3, article 67. <https://doi.org/10.1145/3564284>
16. Ko H., Lee S., Park Y., Choi A. (2022) A survey of recommendation systems: Recommendation models, techniques, and application fields. *Electronics*, vol. 11, no. 1, article 141. <https://doi.org/10.3390/electronics11010141>
17. Andrianov N.A., Atakhodjaeva M.R., Borodin E.I. (2022) Mathematical modeling of a recommender system and data processing of a telecommunications company using machine learning models. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, management, radio electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 17–28 (in Russian). <https://doi.org/10.14529/ctcr220202>
18. Denisova A.I., Sozaeva D.A., Gonchar K.V., Aleksandrov G.A. (2023) Improving the methodology for assessing the economic efficiency of public e-procurement of medicines. *Financial Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 63–81 (in Russian). <https://doi.org/10.31107/2075-1990-2023-4-63-81>
19. Denisova A.I., Sozaeva D.A., Gonchar K.V., Aleksandrov G.A. (2024) Analysis of factors for non-closure of tenders for public procurement of medicines. *Problems of Forecasting*, no. 2, pp. 178–191 (in Russian). <https://doi.org/10.47711/0868-6351-203-178-191>
20. ConsultantPlus (2024) *Resolution of the Government of the Russian Federation of 08.06.2018 N 656 (as amended on 23.12.2024) "On the requirements for operators of electronic platforms, operators of specialized electronic platforms, electronic platforms, specialized electronic platforms and the functioning of electronic platforms, specialized electronic platforms, confirmation of compliance with such requirements, on the loss of the status of an operator of an electronic platform, operator of a specialized electronic platform by a legal entity"*. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_300361/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_300361/) (accessed 10 October 2024) (in Russian).

21. scikit-learn: Machine Learning in Python (2025) *RandomForestClassifier*. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (accessed 11 February 2025).
22. CatBoost library (2025) *CatBoostClassifier*. Available at: [https://catboost.ai/docs/en/concepts/python-reference\\_catboostclassifier](https://catboost.ai/docs/en/concepts/python-reference_catboostclassifier) (accessed 11 February 2025).
23. PyTorch (2025) *torch.nn*. Available at: <https://pytorch.org/docs/stable/nn.html> (accessed 11 February 2025).
24. scikit-learn: Machine Learning in Python (2025) *Ensembles: Gradient boosting, random forests, bagging, voting, stacking*. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/modules/ensemble.html> (accessed 11 February 2025).
25. Lin T.-Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. (2017) Focal loss for dense object detection. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy*, pp. 2999–3007. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324>
26. Statista (2025) *Content available on Disney's new streaming service's (Disney+) compared to Netflix in the United States as of April 2019*. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1041104/disney-catalog-netflix-comparison-us/> (accessed 10 October 2024).
27. Safronov A. (2019) Netflix US subscribers fall for first time in 8 years. *RBC Investments*. Available at: <https://quote.ru/news/article/5d3013649a794752c4a31fee> (accessed 10 October 2024).
28. Morley M. (2025) Netflix library by the numbers 2024: 589 new originals released and library swells to over 7,000 titles. *What's on Netflix*. Available at: <https://www.whats-on-netflix.com/news/netflix-library-by-the-numbers-2024/> (accessed 10 May 2025).
29. Moore K. (2025) Netflix added over 10,000 episodes of TV in 2024. *What's on Netflix*. Available at: <https://www.whats-on-netflix.com/news/netflix-added-over-10000-episodes-of-tv-in-2024/> (accessed 10 May 2025).
30. Statista (2025) *Number of Netflix paying streaming subscribers worldwide as of 4th quarter 2024, by region*. Available at: <https://www.statista.com/statistics/483112/netflix-subscribers/> (accessed 10 May 2025).
31. Alliance in the field of artificial intelligence (2020) *Recommender system in the field of electronic procurement*. Available at: <https://ai-russia.ru/library/roseltorg-system> (accessed 10 October 2024).

### About the authors

#### Anna I. Denisova

Candidate of Sciences (Economics);

Senior Lecturer, Institute of Information Systems, Department of Mathematical Methods in Economics and Management, State University of Management, 99, Ryazansky Ave., Moscow 109542, Russia;

E-mail: [aidenisova@inbox.ru](mailto:aidenisova@inbox.ru)

ORCID: 0000-0002-2296-237X

#### Dzhamilya A. Sozaeva

Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor;

Head of Laboratory, Project-training Laboratory for Research and Development in the Field of Digitalization of Management, State University of Management, 99, Ryazansky Ave., Moscow 109542, Russia;

Associate Professor, Department of Valuation Activities and Corporate Finance, Synergy University, 80, Bldg. G, Leningradsky Ave., Moscow 125190, Russia;

E-mail: [dasozaeva@gmail.com](mailto:dasozaeva@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-3955-891X

#### Konstantin V. Gonchar

Junior Researcher, Project-training Laboratory for Research and Development in the Field of Digitalization of Management, State University of Management, 99, Ryazansky Ave., Moscow 109542, Russia;

Senior Lecturer, Department of IU-3, Bauman Moscow State Technical University, 5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia;

E-mail: [goncharkv@gmail.com](mailto:goncharkv@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-7345-3340

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.41.53

# Аватар-модель покупателя на сетях Колмогорова-Арнольда

Ф.В. Краснов 

E-mail: krasnov.fedor2@rwb.ru

Ф.И. Курушин 

E-mail: kurushin.fedor@rwb.ru

Исследовательский центр ООО «Вайлдберриз СК» на базе Инновационного центра «Сколково», Москва, Россия

## Аннотация

В условиях стремительного развития электронной торговли перед специалистами встают новые задачи по персонализации поиска и рекомендаций товаров. Существующие монолитные системы поиска и рекомендаций становятся слишком громоздкими и не могут обеспечить должного уровня понимания пользователей электронной торговой площадки (ЭТП), несмотря на доступ к полной информации об их интересах и истории покупок. Широко используемые механизмы коллаборативной фильтрации также сталкиваются с проблемами: недостатком разнообразия предложений и низкой способностью удивлять. Кроме того, они характеризуются медленной обновляемостью рекомендаций и подменой «персонального» подхода на «такой же, как у других». Мы предлагаем решение этих проблем путём разработки индивидуального для каждого пользователя ЭТП поискового ассистента «Элочка». Цифровая аватар-модель пользователя непрерывно осуществляет поиск нужных товаров, исходя из истории взаимодействия пользователя с ЭТП. Мы следуем принципу изолированности — аватар-модели не обмениваются информацией друг о друге. При регистрации нового пользователя ему создаётся новая аватар-модель, которая затем самостоятельно развивается и адаптируется к его предпочтениям и поведению. Каждая аватар-модель имеет свой собственный язык для формирования поисковых запросов, что позволяет более точно учитывать предпочтения и интересы пользователя. Сложность аватар-модели может изменяться в зависимости от интенсивности взаимодействий с ЭТП, что обеспечивает более гибкую и адаптивную систему рекомендаций. Благодаря непрерывности взаимодействий аватар-модели могут отслеживать лучшие условия для приобретения товаров, напоминать об окончании срока годности товара и необходимости повторного приобретения товаров массового спроса. Изолированность аватар-моделей позволяет переобучать их после каждого события без значительного влияния на общую систему поиска и рекомендаций. Применение нейросетевых структур и сетей Колмогорова-Арнольда в аватар-моделях позволяет улучшить основные показатели эффективности поиска и рекомендаций, такие как новизна и разнообразие.

**Ключевые слова:** большие языковые модели, поиск продуктов, рекомендации поисковых запросов, преобразование поисковых запросов, определение намерений пользователей, анализ текста, машинное обучение, электронная коммерция

**Цитирование:** Краснов Ф.В., Курушин Ф.И. Аватар-модель покупателя на сетях Колмогорова-Арнольда // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 2. С. 41–53. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.41.53

## Введение

Искусственный интеллект всё больше проникает в научную методологию и повседневную жизнь. С одной стороны, пересматриваются подходы к классификации научных знаний, например, в ГРНТИ (государственный рубрикатор научно-технической информации) появился раздел «28.23: искусственный интеллект». С другой стороны, в интернет-магазине женской одежды наукоёмкость процессов сравнима с камеральными работами в геологии (процесс обработки и анализа геологических данных, полученных в результате проведения полевых работ) [1].

В данной работе представлена аватар-модель персонального помощника в совершении покупок на электронных торговых площадках (ЭТП), получившая название «Эллочка» – в честь героини произведения Ильфа и Петрова «12 стульев». Напомним, в этом романе Эллочка – красивая и избалованная молодая женщина, живущая в свое удовольствие за счет мужа, занятая в основном приобретением вещей.

Персональные помощники, основанные на искусственных нейронных сетях глубокого обучения, стали привычным атрибутом клиентского обслуживания в транспортной сфере, банковской отрасли и электронной торговле. Однако «персональность» такого помощника ограничивается лишь временным стремлением сэкономить ресурсы в процессе сеанса обслуживания. Личные предпо-

чтения и настроения пользователя никак не влияют на работу системы. Персональный помощник не сможет продолжить прерванный разговор с того же места и, скорее всего, забудет его начало.

В основе персональных помощников и моделей поиска и рекомендаций в электронной коммерции лежат большие языковые модели (англ. Large Language Model, LLM), основанные на архитектуре трансформеров [2].

Однако каждая большая языковая модель содержит файл со словарём, который она использует далее в нейросетевых структурах уже в виде порядковых номеров токенов из словаря. Это связано с тем, что линейная алгебра работает с моделями чисел, а не со строковыми переменными.

Размер словаря LLM во многом определяет количество параметров модели, так как он является одной из основных размерностей LLM наряду с размером окна восприятия модели. В *таблице 1* приведены размеры словарей наиболее результативных LLM согласно эталонному тесту MTEB (Massive Text Embedding Benchmark) [3].

Системы поиска и рекомендаций представляют собой высоконадёжные информационные системы, которые обеспечивают непрерывность процесса обслуживания и минимальные задержки при взаимодействии с покупателями и продавцами.

Быстродействие в обслуживании поисковых запросов достигается за счёт горизонтального мас-

Таблица 1.

### Показатели отраслевых исследований

Модель	Размер словаря	Количество русских слов
alan-turing-institute/mt5-large-finetuned-mnli-xtreme-xnli	250100	26427
ai-forever/rugpt3large_based_on_gpt2	50257	43213
aeonium/Aeonium-v1-Base-4B	128000	102913

штабирования вычислительных ресурсов. В рамках одной сессии обслуживания пользователя не закрепляется определённый вычислительный ресурс. Это приводит к необходимости синхронизации пользовательских действий, которые изменяют, например, баланс, остатки на складе или содержимое корзины покупателя. Эти цифровые объекты существуют в единственном числе и управляются централизованно.

Основной вклад данного исследования состоит в формулировании и апробации нового, децентрализованного подхода к построению систем поиска и рекомендаций в электронной коммерции, ставящем в центр аватар-модель покупателя (рис. 1).

Вторым по важности вкладом данного исследования является расширение подхода к построению искусственных сетей глубокого обучения для обработки временных рядов новым классом сетей Колмогорова–Арнольда с использованием вейвлетных преобразований.

### 1. Методика

Для того чтобы избежать общеизвестных проблем с новизной и разнообразием в товарных рекомендациях [4–7], в данном исследовании предлагается рассматривать рекомендации поисковых запросов, приводящих к нужным товарам. Выражаясь бытовым языком, рекомендовать как искать товар, а не пытаться угадать искомый товар. Аналогичный подход к рекомендациям с использованием текста предложен в работе [8], в которой авторы получают существенное улучшение метрик за счёт отказа от рекомендаций товаров по их номеру, как в работах [9, 10].

Другой известной проблемой генеративных моделей на основе LLM является склонность к галлюцинациям, когда нейросеть генерирует «придуманную» ложную информацию. Для того чтобы побороть негативные эффекты от галлюцинирования, применяются различные методики регуляризации вывода модели. Например, отражение модели на саму себя [11] или использование адаптивной спектральной нормализации [12]. Авторы настоящего исследования снизили негативный эффект от галлюцинирования за счёт того, что создаваемый текст поискового запроса предназначен не для человека, а для системы поиска, другими словами, для другой модели машинного обучения. Что позволило снизить требования к лексике и связанности генерируемого текста поискового запроса, так как наличие токенов достаточно для корректного семантического поиска по товарам, в свою очередь несогласованность токенов по падежам или повторение влияет на релевантность поиска незначительно.

Методически аватар-модель построена на основании парадигмы информационного поиска – композиции кандидатной и ранжирующей моделей [13]. Авторы настоящего исследования развили этот подход и вместо ранжирующей модели создали модель отбора пар запросов кандидатов с фиксированными пятью уровнями отношений: «сужение», «расширение», «перефразирование», «разные характеристики», «сопутствующие товары». Что дало возможность создавать более сфокусированные на покупателе сценарии взаимодействия в зависимости от наличия или отсутствия покупок в сессии взаимодействия с ЭТП.

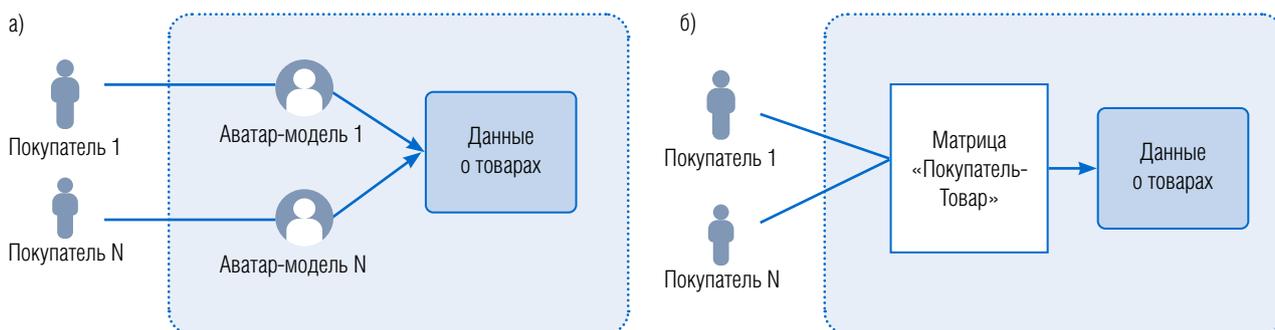


Рис. 1. Схема работы рекомендаций:

а) децентрализованная (предлагается в данном исследовании); б) централизованная.

Современные модели токенизации в LLM построены на сжатых словарях из субсловарных  $n$ -грамм [14, 15]. Такой подход решает проблему отсутствия слова в словаре и уменьшает потребление памяти, но токенизация производится неоднозначно — одно и то же предложение может быть токенизировано на различные наборы токенов. Это свойство используется при обучении LLM, как бутстрэппинг для более равномерного распределения обратного распространения ошибки. Для аватар-модели нет необходимости в решении проблемы токенизации новых слов, так как аватар-модель использует все токены из словарного запаса данного пользователя. Более того, аватар-модель использует словарные  $n$ -граммы длиной до четырех слов, чтобы получать события от структур токенов. Например, от названий торговых марок, состоящих из нескольких слов, таких как «Рот Фронт». Очевидно, что на поисковый запрос «Рот Фронт» не стоит искать товары с токенами «рот» и «фронт».

При обновлении аватар-модели модель токенизации создаётся заново, так как аватар-модель обладает в 103 раза меньшим количеством параметров для обучения чем, например, модель GPT2 (120 млн).

## 2. Сети Колмогорова–Арнольда

Сети Колмогорова–Арнольда (англ. Kolmogorov–Arnold Networks, KAN) демонстрируют многообещающие результаты в различных генеративных моделях [16] и моделях временных рядов [17]. Покажем преимущества KAN по сравнению с многослойным перцептроном Румельхарта (англ. Multilayer Perceptron, MLP). Пусть дан MLP с размерностью  $n$  на входе и  $m$  на выходе, содержащий полносвязанные слои искусственной нейронной сети от  $l$  до  $l + 1$ . Тогда уравнение MLP в матричной форме задается формулой (1):

$$x^{(l+1)} = W_{l+1,l} x^{(l)} + b^{(l+1)}, \quad (1)$$

где  $W_{l+1,l}$  — матрица весов, соединяющая слой  $l$  и слой  $l + 1$ ;

$x^{(l)}$  — входящий вектор;

$x^{(l+1)}$  — исходящий вектор;

$b^{(l+1)}$  — смещение для слоя  $l + 1$ .

Матрица весов  $W_{l+1,l}$  может быть представлена следующим образом:

$$W_{l+1,l} = \begin{pmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,n} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m,1} & w_{m,2} & \cdots & w_{m,n} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $w_{i,j}$  — это вес между  $i$ -ым узлом в  $l + 1$ -ом слое и  $j$ -ым узлом в  $l$ -ом слое ( $i = 1, 2, \dots, m$  и  $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Тогда вектор смещения  $b^{(l+1)}$  может быть представлен в следующем виде:

$$b^{(l+1)} = \begin{pmatrix} b_1^{(l+1)} \\ b_2^{(l+1)} \\ \vdots \\ b_m^{(l+1)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, в развёрнутом виде уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x_1^{(l+1)} \\ x_2^{(l+1)} \\ \vdots \\ x_m^{(l+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,n} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m,1} & w_{m,2} & \cdots & w_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^{(l)} \\ x_2^{(l)} \\ \vdots \\ x_n^{(l)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1^{(l+1)} \\ b_2^{(l+1)} \\ \vdots \\ b_m^{(l+1)} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Теперь предположим, что у нас есть  $L$  слоёв, каждый из которых имеет структуру (4). Пусть  $\sigma(\cdot)$  это функция активации. Тогда компактная формула для всей сети MLP  $f(x)$ , где  $x$  — входной вектор, а  $f(\cdot)$  — это MLP, задаётся следующим образом (5):

$$f(x) = x^{(L)}, \quad (5)$$

где

$$x^{(l+1)} = \sigma(W_{l+1,l} x^{(l)} + b^{(l+1)}), \quad (6)$$

для  $l = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ , а  $x^{(l+1)}$  обозначает вектор на выходе.

Что эквивалентно следующему представлению (7):

$$f(x) = \sigma \left( W_L \sigma(W_{L-1} \cdots \sigma(W_2 \sigma(W_1 x + b_1) + b_2) \cdots + b_{L-1}) + b_L \right). \quad (7)$$

Теперь рассмотрим, как создаются отношения между слоями в KAN. Пусть  $x^{(l)}$  — вектор с размерностью  $n$ . Тогда транспонированный вектор можно представить следующим образом:

$$x^{(l)} \in R^n \Rightarrow (x^{(l)})^T \in R^{1 \times n}.$$

Обозначим матрицу транспонированных векторов  $x^{(l)}$  с размерностью  $m$  строк и  $n$  столбцов, как  $X_l$ :

$$X_l = \begin{pmatrix} (x^{(l)})^T \\ (x^{(l)})^T \\ \vdots \\ (x^{(l)})^T \end{pmatrix} \in R^{m \times n}.$$

Каждая строка матрицы  $X_l$  – это транспонированный вектор  $(x^{(l)})^T$ . Теперь определим оператор  $A_o$ , который действует на матрицу  $\Phi_{l+1,l}(X_l)$ . Этот оператор суммирует элементы каждой строки матрицы и выводит результирующий вектор  $r$ . Формула определения  $A_o$  выглядит следующим образом:

$$A_o(\Phi_{l+1,l}(X_l)) = r,$$

где  $r$  – вектор, получаемый из следующего выражения (8):

$$r_i = \sum_j [\Phi_{l+1,l}(X_l)]_{ij} = \sum_{j=1}^n \phi_{i,j}(x_j^{(l)}), \text{ для } i = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

В выражении (8),  $[\Phi_{l+1,l}(X_l)]_{ij}$  соответствует элементу в  $i$ -й строке и  $j$ -ом столбце матрицы  $\Phi_{l+1,l}(X_l)$ .

Таким образом, оператор  $A_o$  может быть записан в следующем виде:

$$A_o(\Phi_{l+1,l}(X_l)) = \sum_j [\Phi_{l+1,l}(X_l)]_{ij}.$$

По определению  $A_o$  осуществляет действие над матрицей  $\Phi_{l+1,l}(X_l)$ , суммирует элементы в каждой строке и получает на выходе результирующий вектор  $r$ . Действительно,  $\Phi_{l+1,l}$  получает на входе вектор  $x^{(l)}$  и выдает на выходе данные, где каждый элемент из  $x^{(l)}$  является суммой в виде одного элемента (9):

$$X_{l+1,l} = \Phi_{l+1,l}(X_l), \quad (9)$$

где:

$$\Phi_{l+1,l}(X_l) = \begin{pmatrix} \phi_{1,1}(x_1^{(l)}) & \phi_{1,2}(x_2^{(l)}) & \dots & \phi_{1,n}(x_n^{(l)}) \\ \phi_{2,1}(x_1^{(l)}) & \phi_{2,2}(x_2^{(l)}) & \dots & \phi_{2,n}(x_n^{(l)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{m,1}(x_1^{(l)}) & \phi_{m,2}(x_2^{(l)}) & \dots & \phi_{m,n}(x_n^{(l)}) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

В выражении (10)  $\Phi_{l+1,l}$  является функцией активации между слоями  $l$  и  $l + 1$ . Каждый элемент  $\phi_{ij}(\cdot)$  обозначает функцию активации, которая соединяет  $j$ -й нейрон в слое  $l$  с  $i$ -м нейроном в слое  $l + 1$ . Вместо умножения уравнение (10) вычисляет функцию с обучаемыми параметрами. Следова-

тельно, если  $X_o$  рассматривать как входные данные, которые содержат только входной вектор в виде строк, то для всей KAN выходные данные после  $L$  слоёв будут следующими (11):

$$\begin{aligned} f_{KAN}(X_o) &= x^{(L)} = A_o(\Phi_{L,L-1}(X_{L-1})) = \\ &= A_o \left( \Phi_{L,L-1} \left( \begin{pmatrix} (A_o(\Phi_{L-1,L-2}(X_{L-2})))^T \\ (A_o(\Phi_{L-1,L-2}(X_{L-2})))^T \\ \vdots \\ (A_o(\Phi_{L-1,L-2}(X_{L-2})))^T \end{pmatrix} \right) \right) = \\ &= A_o \left( \Phi_{L,L-1} \left( \begin{pmatrix} (A_o(\Phi_{L-1,L-2} \dots (A_o(\Phi_{1,0}(X_o))))^T \\ (A_o(\Phi_{L-1,L-2} \dots (A_o(\Phi_{1,0}(X_o))))^T \\ \vdots \\ (A_o(\Phi_{L-1,L-2} \dots (A_o(\Phi_{1,0}(X_o))))^T \end{pmatrix} \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, традиционные MLP используют фиксированные нелинейные функции активации в каждом узле, линейные веса и смещения для преобразования входных данных по слоям. Выходные данные на каждом слое вычисляются с помощью линейного преобразования, за которым следует фиксированная функция активации. Во время обратного распространения ошибки вычисляются градиенты функции потерь относительно весов и смещений для обновления параметров модели. В отличие от этого, KAN заменяют линейные веса одномерными функциями, которые можно обучать, размещая на рёбрах, а не на узлах. В качестве одномерных функций наиболее часто используют вейвлетные преобразования: МНАТ-вейвлет («Мексиканская шляпа»), вейвлет Шеннона, вейвлет Морле, вейвлет Гаусса (таблица 2).

В узлах производится суммирование одномерных функции из предыдущих уровней. Каждая функция может быть адаптирована, что позволяет KAN обучать как активацию, так и преобразование входных данных. Это изменение приводит к повышению точности и интерпретируемости, поскольку KAN могут лучше аппроксимировать функции с использованием меньшего количества параметров. Во время обратного распространения ошибки в KAN градиенты вычисляются относительно одномерных функций, обновляя их, чтобы минимизировать функцию потерь. Это приводит к более эффективному обучению для сложных и многомерных функций.

Таблица 2.

## Вейвлеты, используемые в качестве одномерных функций

Название	Формула
МНАТ-вейвлет («Мексиканская шляпа»)	$\psi(t) = \frac{-d^2}{dt^2} e^{-t^2/2} = (1-t^2)e^{-t^2/2}$
Вейвлет Шеннона	$\psi_k^n(t) := 2^{n/2} \psi^{(Sha)}(2^n t - k), \text{ где } \psi^{(Sha)}(t) := \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}$
Вейвлет Морле	$\psi_\sigma(t) = c_\sigma \pi^{-1/4} e^{-t^2/2} (e^{iat} - k_\sigma), \text{ где } k_\sigma = e^{-\sigma^2/2}, c_\sigma = (1 + e^{-\sigma^2} - 2e^{-3\sigma^2/4})^{-1/2}$
Вейвлет Гаусса	$\psi(t) = \frac{-d}{dt} e^{-t^2/2}$

### 3. Модель сокращения разнообразия поисковых запросов

В сфере электронной коммерции существует проблема «длинного хвоста» поисковых запросов, которая затрудняет создание эффективных моделей. Это связано с большим разнообразием запросов, опечатками, синонимами и сленгом.

Современные подходы для переформулировки запросов используют нейросетевые методы. С помощью выделения текстовых факторов строятся векторные представления поисковых запросов, а затем осуществляется поиск «ближайших соседей» в векторном пространстве с использованием Retrieval Augmented Generation (RAG) языковых моделей [18] и моделей трансформеров BERT [19].

Поиск по товарам позволяет использовать поведенческие данные пользователей от совершения покупок. Таким образом, используется коллаборативная парадигма: по связи «пользователь-товар» определяют последовательности, приведшие к покупке, и используют их как варианты для текущего пользователя [20]. В настоящем исследовании задача переформулирования запросов (ПЗ) рассмотрена с позиции связи «запрос-товар» для применения суррогатной функции [22] в аватар-модели.

Помимо переформирования запросов также ставится задача определения типа связи «запрос-запрос» и «запрос-товар». В качестве примера, демонстрирующего различные типы связей, выделенные авторами, приведем *таблицу 3*.

Таблица 3.

## Примеры запросов, демонстрирующих различные типы связей

Исходный запрос	Замена	Сценарий
Иphone 16 pro max	Apple iPhone 16 Pro Max	Перефразированные
Платье женское красное	Платье женское	Расширение
Платье	Платье женское красное	Сужение
Платье женское красное	Платье женское вечернее	Другие характеристики
Платье женское вечернее	Туфли на каблук	Заменители
Туфли на каблук	Кроссовки для бега	Нерелевантное

Для более наглядного представления, обозначим множество всех поисковых запросов как  $Q$ . Приблизительное количество элементов в этом множестве составляет  $Q_v \approx 10^{10}$ , что сопоставимо с потоком событий, анализируемых при поиске бозона Хиггса [21].

Из исследования [23] известно, что 98% всех покупок совершается с использованием ограниченного множества запросов, которые мы обозначим как  $Q_{HPQ}$ . Без ограничения общности можно считать, что  $Q_{HPQ}$  не зависит от времени. Оставшееся множество запросов обозначим как  $Q_{LPQ}$ , где HPQ и LPQ – общепринятые сокращения для high-performing и low-performing запросов соответственно.

Исходя из определения множества  $Q$ , можем записать следующие уравнения:

$$Q = Q_{HPQ} \cup Q_{LPQ}, \tag{12}$$

$$\emptyset = Q_{HPQ} \cap Q_{LPQ}. \tag{13}$$

Из характера распределения  $Q$  следует, что  $|Q_{LPQ}| \gg |Q_{HPQ}|$ . Задача переформулировки запросов тогда может быть рассмотрена как поиск функции  $F$  такой, что  $F(Q_{LPQ}) \Rightarrow Q_{HPQ}$ . Рассмотрим запросы  $q_{HPQ}^i \in Q_{HPQ}$  и  $q_{LPQ}^i \in Q_{LPQ}$  приводящие к покупкам продукта  $p_i \in P$  из всего каталога продуктов  $P$ . Тогда можем записать, что есть суррогатная функция  $F$ , которая приводит  $q_{LPQ}^i, q_{HPQ}^i$  для продукта  $p_i$

$$F(Q_{LPQ}^i) \Rightarrow Q_{HPQ}^i, \text{ для } \forall p_i \in P. \tag{14}$$

Выражение (14) позволяет сформулировать условия получения набора данных для использования численных методов получения  $F$ , например с помощью искусственных нейронных сетей глубокого обучения. Для этого необходимо собрать пары  $\{q_{LPQ}^i, q_{HPQ}^i\}$  из журналов поиска пользователей.

Для формирования негативных примеров был использован подход Negative Batch Sampling [10],

при этом количество негативных примеров варьировалось от 5 до 12. Использование большего количества негативных примеров улучшало показатели модели не значительно, но требовало существенно больших ресурсов для обучения модели.

На рисунке 2 изображена схема аватар-модели в виде последовательности моделей токенизации, модели переформулирования запросов (ПЗ) и KAN.

#### 4. Исследовательские вопросы

Данное исследование носит прикладной характер. Изложенная методика служит источником для исследовательских вопросов и проверок с помощью численных методов. При создании методики авторы сформулировали следующие исследовательские вопросы:

ИВ-1: Каково распределение размеров словаря, используемого пользователями при формировании поисковых запросов?

ИВ-2: Как количественно улучшает аватар-модель использование KAN по сравнению с MLP?

#### 5. Эксперимент

Для проверки нашей методики мы собрали последовательности поисковых запросов и покупок за год по 92 миллионам случайных покупателей. Получился набор данных  $D$  с уникальным ключом «пользователь» и временным рядом [«запрос1», ..., «покупка1», «конец сессии», «запрос  $N$ »]. Каждая покупка представлена в виде текста из названия, бренда и характеристик товара. В поисковых запросах исправлены опечатки, добавлены синонимы и сделано отображение низко производительных запросов на высоко производительные. Так для каждого пользователя в  $D$  получен упорядоченный по времени текст, состоящий из запросов и



Рис. 2. Схема аватар-модели.

описаний купленных товаров. На основании этого текста производится авторегрессионное обучение аватар-модели каждого пользователя.

При помощи полученной аватар-модели для каждого пользователя была построена прогнозная модель: на основании введённых поисковых запросов прогнозируется следующий поисковый запрос из индекса поисковых запросов. Производится пессимизация на слова из купленных товаров с учётом их удалённости по времени взаимодействия с пользователем. Прогнозируется несколько поисковых запросов для пользователя. Приведём сценарий использования результатов данного исследования: Пользователь заходит на ЭТП, не вводит поисковый запрос, видит поисковую выдачу по товарам, которые ему близки по словарному запасу и при этом не содержат недавних покупок на первых местах. Поисковая выдача отражает текущее состояние каталога товаров, запасов, региона, популярности и других условий, повышающих релевантность. Поисковая выдача обладает высоким разнообразием и новизной, так как содержит товары из нескольких спрогнозированных запросов для пользователя. Выдача не содержит купленные товары на первых позициях.

Для экспериментального ответа на исследовательский вопрос ИВ-1 было построено распределение количества уникальных слов для каждого пользователя из набора данных *D* (рис. 3).

Из распределения на рисунке 3 получаем, что максимальный размер словаря не превышает 1500 слов. По сравнению размерами словаря в LLM, приведённых в таблице 1, размер словаря отдельного пользователя меньше на порядок. Этот факт даёт основания для значительного ускорения работы аватар-модели по сравнению с LLM.

Для поиска ответа на исследовательский вопрос ИВ-2 была проведена серия экспериментов по обучению аватар-модели на наборе данных *D*. В качестве гиперпараметров аватар-модели были рассмотрены следующие варианты:

Модель токенизации:

Unigram, byte pair encoding (BPE), **Word**

Размер словаря: 100, 1000, **«без ограничений»**

Количество примеров для субсловарной токенизации: 3, 5, 7, 9, **без сэмплирования**

Модель ПЗ:

Размерность векторного пространства представления токенов: 32, **64**, 128, 256

Параметры рекуррентной нейронной сети (RNN):

Количество слоев: **2**, 3, 4, 5, 6

Двунаправленность: да, **нет**

Тип: LSTM, GRU

In-batch negative sampling: 3, 5, 7, 12

Dual Margin Cosine Embedding Loss: positive margin **0.9**, negative margin **0.2**

Общее векторное представление токенов: нет, **да**

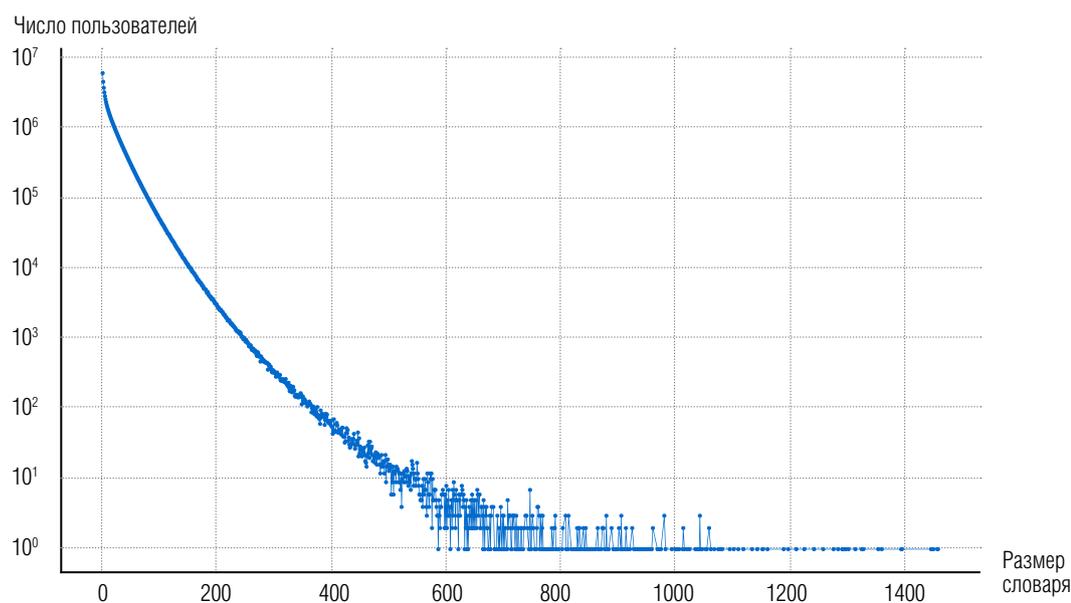


Рис. 3. Распределение количества уникальных слов для каждого пользователя.

### Модель KAN:

Тип вейвлета: «Мексиканская шляпа», вейвлет Шеннона, вейвлет Морле, вейвлет Гаусса

Всего было проведено 120 экспериментальных сессий, каждая из которых длилась от 12 до 18 часов. В ходе исследования были определены параметры, для которых аватар-модель продемонстрировала наилучшие результаты по скорости сходимости и минимальному значению ошибки обучения.

При всех прочих равных условиях, из распределения, представленного на *рисунке 4*, получен вывод о положительных изменениях в точности при использовании KAN в аватар-модели в сравнении с MLP.

### Заключение

В данном исследовании предлагается новый подход к созданию рекомендательной системы для пользователей в сфере электронной коммерции, названный «Эллочка» в честь героини романа «12 стульев» с небольшим словарным запасом, которая

успешно справлялась с любыми коммуникационными задачами.

Авторами разработана и протестирована методика, основанная на следующих принципах:

1. Отказ от использования монолитной, единой рекомендательной системы для всех пользователей электронной торговой площадки в пользу создания отдельных рекомендательных моделей для каждого пользователя.
2. Построение языковых моделей для рекомендации текстов поисковых запросов на основе словарей токенов малых размеров вместо огромных словарей с субсловарной токенизацией.
3. Применение математического аппарата сетей Колмогорова-Арнольда для улучшения скорости сходимости моделей при обучении.

Методика, предложенная в статье, успешно прошла апробацию на данных работающей электронной торговой площадки и позволила улучшить автономные показатели рекомендательной системы подсказок. ■

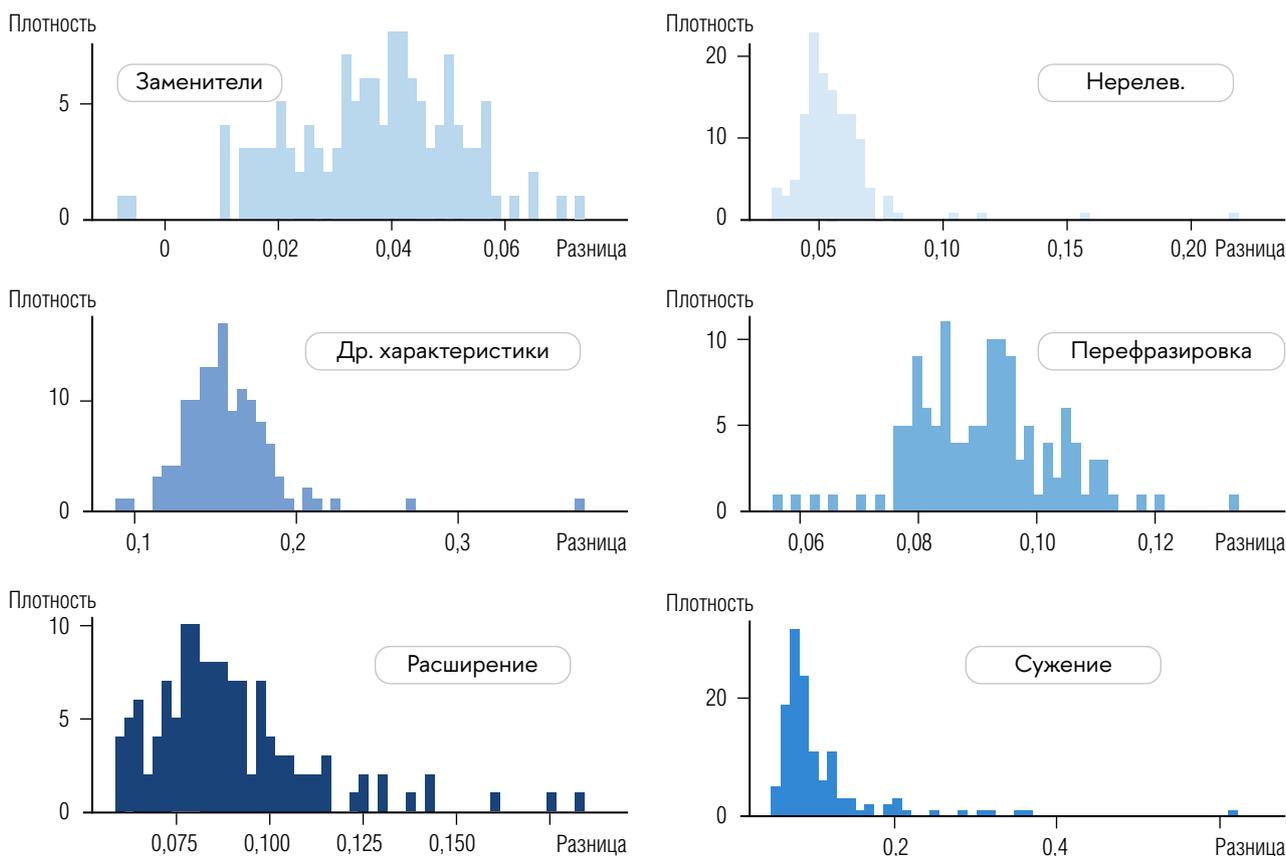


Рис. 4. Распределение разниц в метрике Точность между KAN и MLP.

## Литература

1. Буторин А.В., Муртазин Д.Г., Краснов Ф.В. Способ и система прогнозирования эффективных толщин в межскважинном пространстве при построении геологической модели на основе метода кластеризации спектральных кривых // Пат. RU 2718135 С1 Рос. Федерация; заявка 2019128334 от 09.09.2019, опубл. 30.03.2020. Бюл. № 10.
2. Краснов Ф.В. Использование языковых моделей на основании архитектуры трансформеров для понимания поисковых запросов на электронных торговых площадках // *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. Т. 11. № 9. С. 33–40.
3. Muennighoff N., Tazi N., Magne L., Reimers N. MTEB: Massive text embedding benchmark // *arXiv:2210.07316*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.07316>
4. Li P., Tuzhilin A. When variety seeking meets unexpectedness: Incorporating variety-seeking behaviors into design of unexpected recommender systems // *Information Systems Research*. 2023. Vol. 35. No. 3. <https://doi.org/10.1287/isre.2021.0053>
5. Beyond item dissimilarities: Diversifying by intent in recommender systems / Y. Wang [et al.] // *arXiv:2405.12327*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.12327>
6. Castells P., Hurley N., Vargas S. Novelty and diversity in recommender systems // *Recommender Systems Handbook* (eds. F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira). 2015. Springer, New York, NY. P. 603–646. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4_16)
7. A hybrid bandit framework for diversified recommendation / Q. Ding [et al.] // *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. 2021. V. 35. No. 5. P. 4036–4044. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i5.16524>
8. Text is all you need: Learning language representations for sequential recommendation / J. Li [et al.] // *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2023. P. 1258–1267. <https://doi.org/10.1145/3580305.3599519>
9. BERT4Rec: Sequential recommendation with bidirectional encoder representations from transformer / F. Sun [et al.] // *Proceedings of the 28th ACM international conference on information and knowledge management*. 2019. P. 1441–1450. <https://doi.org/10.1145/3357384.3357895>
10. Klenitskiy A., Vasilev A. Turning dross into gold loss: is BERT4Rec really better than SASRec? // *Proceedings of the 17th ACM Conference on Recommender Systems*. 2023. P. 1120–1125. <https://doi.org/10.1145/3604915.3610644>
11. Towards mitigating LLM hallucination via self reflection / Z. Ji [et al.] // *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2023*. 2023. P. 1827–1843.
12. Егоров Е.А., Рогачев А.И. Исследование влияния адаптивной спектральной нормализации на качество генеративных моделей и стабильность их обучения // *Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления*. 2023. Т. 514. № 2. С. 49–59.
13. Extreme multi-label learning for semantic matching in product search / W.C. Chang [et al.] // *Proceedings of the 27th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2021. P. 2643–2651. <https://doi.org/10.1145/3447548.3467092>
14. Sennrich R., Haddow B., Birch A. Neural machine translation of rare words with subword units // *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2016. P. 1715–1725. <https://doi.org/10.18653/v1/P16-1162>
15. Kudo T., Richardson J. SentencePiece: A simple and language independent subword tokenizer and detokenizer for Neural Text Processing // *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*. 2018. P. 66–71.
16. KAN: Kolmogorov-Arnold networks / Z. Liu [et al.] // *arXiv:2404.19756*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>
17. Vaca-Rubio C. J., Blanco L., Pereira R., Caus M. Kolmogorov-Arnold networks (KANs) for time series analysis // *arXiv:2405.08790*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.08790>
18. Query rewriting for retrieval-augmented Large Language Models / X. Ma [et al.] // *arXiv:2305.14283*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.14283>
19. Chen Z., Fan X., Ling Y. Pre-training for query rewriting in a spoken language understanding system // *2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2020), Barcelona, Spain*. 2020. P. 7969–7973. <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9053531>
20. Bhandari M., Wang M., Poliannikov O., Shimizu K. RecQR: Using Recommendation Systems for Query Reformulation to correct unseen errors in spoken dialog systems // *17th ACM Conference on Recommender Systems (RecSys'23), Singapore*. 2023. P. 1019–1022.
21. The CDF central analysis farm / T.H. Kim [et al.] // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2004. Vol. 51. No. 3. P. 892–896. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.829574>
22. Кулешов А.П. Когнитивные технологии в адаптивных моделях сложных объектов // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2008. № 1. С. 18–29.
23. ROSE: Robust caches for Amazon product search / C. Luo [et al.] // *Companion Proceedings of the Web Conference 2022*. P. 89–93.

## Об авторах

### Краснов Федор Владимирович

кандидат технических наук;

старший специалист по обработке и анализу данных, сотрудник Исследовательского центра ООО «ВБ СК» на базе Инновационного Центра Сколково, Россия, г. Москва, Западный административный округ, Можайский район, ул. Нобеля, 5;

E-mail: krasnov.fedor2@rwb.ru

ORCID: 0000-0002-9881-7371

### Курушин Федор Иванович

аспирант;

специалист по обработке и анализу данных, сотрудник Исследовательского центра ООО «ВБ СК» на базе Инновационного Центра Сколково, Россия, г. Москва, Западный административный округ, Можайский район, ул. Нобеля, 5;

E-mail: kurushin.fedor@rwb.ru

ORCID: 0009-0007-5126-4507

# A customer avatar model based on Kolmogorov–Arnold networks

## Fedor V. Krasnov

E-mail: krasnov.fedor2@rwb.ru

## Fedor I. Kurushin

E-mail: kurushin.fedor@rwb.ru

Research Center of LLC Wildberries SK, Moscow, Russia

## Abstract

The increasing pace of development of e-commerce continues to present new challenges in terms of personalizing product search and recommendations. Monolithic search and recommendation systems have become cumbersome and are unable to effectively address the need for a deeper understanding of users on electronic trading platforms (ETPs) despite having access to comprehensive information about their interests and purchase histories. Collaborative filtering mechanisms which are widely used suffer from a lack of diversity in offerings and a reduced capacity to surprise users. Additionally, the low frequency of recommendation updates and the replacement of “personalized” with “similar to others” concepts contribute to these issues. We have approached the resolution of these issues by developing a shopping assistant named “Ellochka” that is individual for each user of ETP. The digital avatar model of the user continually searches for relevant products based on their history of interaction with ETP. We were guided by the principle of independence – avatar models do not share information with each other. When a new user joins, they are assigned a unique avatar model that evolves independently. Each avatar has its own language to generate search queries. The level of complexity of each avatar can vary

depending on the intensity of its interaction with ETP. Continued interaction with the avatar allows for tracking of optimal purchase conditions, reminding users of expiration dates and the need for re-purchasing frequently purchased items. Isolating the avatar allows it to be retrained after each event, without significantly impacting the overall search and recommendation system. The use of neural network architecture-based and Kolmogorov–Arnold networks in the avatar-model has led to improvements in the main indicators of search and recommendation effectiveness, namely, novelty and diversity.

**Keywords:** large language models, product search, search query recommendations, search query transformation, user intent determination, text analysis, machine learning, e-commerce

**Citation:** Krasnov F.V., Kurushin F.I. (2025) A customer avatar model based on Kolmogorov–Arnold networks. *Business Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 41–53. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.41.53

### References

1. Butorin A.V., Murtazin D.G., Krasnov F.V. (2020) *Method and system for predicting effective thicknesses in the interwell space when constructing a geological model based on the method of clustering spectral curves*. Patent for invention RU 2718135 C1, 03/30/2020. Application No. 2019128334 dated 09/09/2019.
2. Krasnov F. (2023) Query understanding via Language Models based on transformers for e-commerce. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 11, no. 9, pp. 33–40 (in Russian).
3. Muennighoff N., Tazi N., Magne L., Reimers N. (2022) MTEB: Massive text embedding benchmark. *arXiv:2210.07316*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.07316>
4. Li P., Tuzhilin A. (2023) When variety seeking meets unexpectedness: Incorporating variety-seeking behaviors into design of unexpected recommender systems. *Information Systems Research*, vol. 35, no. 3. <https://doi.org/10.1287/isre.2021.0053>
5. Wang Y., Banerjee C., Chucru S., et al. (2024) Beyond item dissimilarities: Diversifying by intent in recommender systems. *arXiv:2405.12327*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.12327>
6. Castells P., Hurley N., Vargas S. (2022) Novelty and diversity in recommender systems. *Recommender Systems Handbook* (eds. F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira). Springer, New York, NY, pp. 603–646. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4_16)
7. Ding Q., Liu Y., Miao C., et al. (2021) A hybrid bandit framework for diversified recommendation. *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, vol. 35, no. 5, pp. 4036–4044. <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i5.16524>
8. Li J., Wang M., Li J., et al. (2023) Text is all you need: Learning language representations for sequential recommendation. *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 1258–1267. <https://doi.org/10.1145/3580305.3599519>
9. Sun F., Liu J., Wu J., et al. (2019) BERT4Rec: Sequential recommendation with bidirectional encoder representations from transformer. *Proceedings of the 28th ACM international conference on information and knowledge management*, pp. 1441–1450. <https://doi.org/10.1145/3357384.3357895>
10. Klenitskiy A., Vasilev A. (2023) Turning dross into gold loss: is BERT4Rec really better than SASRec? *Proceedings of the 17th ACM Conference on Recommender Systems*, pp. 1120–1125.
11. Ji Z., Yu T., Xu Y., et al. (2023) Towards mitigating LLM hallucination via self reflection. *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2023*, pp. 1827–1843.
12. Egorov E.A., Rogachev A.I. (2023) Adaptive spectral normalization for generative models. *Doklady Mathematics*, vol. 108(suppl. 2), pp. S205–S214. <https://doi.org/10.1134/S1064562423701089>
13. Chang W.C., Jiang D., Yu H.F., et al. (2021) Extreme multi-label learning for semantic matching in product search. *Proceedings of the 27th ACM SIGKDD conference on knowledge discovery & data mining*, pp. 2643–2651.
14. Sennrich R., Haddow B., Birch A. (2016) Neural machine translation of rare words with subword units. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp. 1715–1725. <https://doi.org/10.18653/v1/P16-1162>
15. Kudo T., Richardson J. (2018) SentencePiece: A simple and language independent subword tokenizer and detokenizer for Neural Text Processing. *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*, pp. 66–71.
16. Liu Z., Wang Y., Vaidya S., et al. (2024) KAN: Kolmogorov-Arnold networks. *arXiv:2404.19756*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756>
17. Vaca-Rubio C. J., Blanco L., Pereira R., Caus M. (2024) Kolmogorov-Arnold networks (KANs) for time series analysis. *arXiv:2405.08790*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.08790>

18. Ma X., Gong Y., He P., et al. (2023) Query rewriting for retrieval-augmented Large Language Models. *arXiv:2305.14283*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.14283>
19. Chen Z., Fan X., Ling Y. (2020) Pre-training for query rewriting in a spoken language understanding system. *2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2020), Barcelona, Spain*, pp. 7969–7973. <https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9053531>
20. Bhandari M., Wang M., Poliannikov O., Shimizu K. (2023) RecQR: Using Recommendation Systems for Query Reformulation to correct unseen errors in spoken dialog systems. *17th ACM Conference on Recommender Systems (RecSys'23), Singapore*, pp. 1019–1022.
21. Kim T.H., Neubauer M., Sfiligoi I., et al. (2004) The CDF central analysis farm. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, no. 3, pp. 892–896. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.829574>
22. Kuleshov A.P. (2008) Cognitive technologies in adaptive models of complex objects. *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy*, vol. 1, pp. 18–29.
23. Luo C., Lakshman V., Shrivastava A., et al. (2022) ROSE: Robust caches for Amazon product search. *WWW '22: Companion Proceedings of the Web Conference 2022*, pp. 89–93. <https://doi.org/10.1145/3487553.3524213>

### About the authors

#### **Fedor V. Krasnov**

Candidate of Sciences (Technology);

Senior Data Scientist, Research Center of WB SK LLC based on the Skolkovo Innovation Center, 5, Nobel St., Mozhaisk District, Western Administrative District, Moscow, Russia;

E-mail: [krasnov.fedor2@rwb.ru](mailto:krasnov.fedor2@rwb.ru)

ORCID: 0000-0002-9881-7371

#### **Fedor I. Kurushin**

Doctoral Student;

Data Scientist, Research Center of WB SK LLC based on the Skolkovo Innovation Center, 5, Nobel St., Mozhaisk District, Western Administrative District, Moscow, Russia;

E-mail: [kurushin.fedor@rwb.ru](mailto:kurushin.fedor@rwb.ru)

ORCID: 0009-0007-5126-4507

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.54.76

# Математическая модель и интеллектуальная система анализа интенсивности изменений мегапроектов: роль временных центров управления

П.А. Михненко 

E-mail: pmihnenko@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## Аннотация

Мегапроекты представляют собой масштабные инвестиционные программы со сложной организационной структурой, объединяющие множество заинтересованных сторон (стейкхолдеров), взаимодействие которых ведет к перераспределению влияния и созданию временных центров управления. В условиях нестабильной и неопределенной внешней среды такое поведение стейкхолдеров может привести к недостижению поставленных целей мегапроекта. Важной научной задачей является разработка математических моделей и методов анализа и управления изменениями мегапроектов. Настоящее исследование направлено на создание математической модели и разработку информационной системы нейросетевого анализа интенсивности изменений мегапроектов. Управление мегапроектом описывается векторно-матричной моделью динамической системы с обратной связью по результатам изменений. Для выявления повторяющихся паттернов событий использовался метод событийно-ориентированного анализа, позволяющий обосновать новые подходы к управлению, направленные на снижение неопределенности и повышение эффективности реализации мегапроектов. С использованием разработанных инструментов был проведен ретроспективный нейросетевой анализ интенсивности изменений мегапроекта «Северный поток – 2». В рамках исследования были идентифицированы ключевые группы стейкхолдеров, взаимодействие которых существенно влияло на реализацию проекта: группа 1 – ПАО «Газпром», европейские компании, правительства России и Германии, поддерживающие проект; группа 2 – правительства транзитных стран, США, экологические организации и страны Балтийского региона, выступающие против проекта или выражающие озабоченность его последствиями. Показано, что интеграция отдельных групп стейкхолдеров

способствует образованию временных центров управления с различными интересами, что вызывает увеличение как положительных, так и отрицательных изменений в проекте. Результатом работы стала разработка прототипа информационной системы анализа интенсивности изменений мегапроектов, включающего в себя: математическую модель управления изменениями мегапроекта; методику нейросетевого анализа, основанную на использовании большой языковой модели для обработки текстовой информации и генерации количественных оценок; программный интерфейс для загрузки документов, автоматизированной обработки данных и визуализации результатов. В качестве нейросети применялась большая языковая модель Qwen 2.5-Plus, которая не была специально адаптирована под данную задачу, однако ее параметры были откалиброваны для проведения анализа интенсивности изменений мегапроектов. Прототип системы дает возможность пользователям анализировать взаимодействие стейкхолдеров, оценивать интенсивность изменений и прогнозировать потенциальные риски на основе исторических данных. Перспективным направлением дальнейшего исследования является применение разработанной модели и методики нейросетевого анализа для сравнительных исследований различных мегапроектов.

**Ключевые слова:** мегапроект, «Северный поток – 2», стейкхолдеры, интеграционная активность, неопределенность, интенсивность изменений, временный центр управления изменениями, математическая модель, большая языковая модель, нейросетевой анализ, информационная система

**Цитирование:** Михненко П.А. Математическая модель и интеллектуальная система анализа интенсивности изменений мегапроектов: роль временных центров управления // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 2. С. 54–76. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.54.76

### Введение

**М**егапроекты – это крупномасштабные инвестиционные проекты, требующие значительных ресурсов, с длительными сроками реализации и влиянием на экономику, общество и окружающую среду [1]. Их активная реализация связана с трансформацией глобальной экономической системы [2]. Стейкхолдерами мегапроектов выступают государственные органы, частные компании, инвесторы и общественные организации, а результаты затрагивают жизнь миллионов людей [3], вызывая широкий спектр ожиданий [4, 5].

Ключевыми проблемами мегапроектов являются высокая стоимость, перерасход бюджетов и задержки сроков [6], причем вероятность превышения стоимости и сроков возрастает с увеличением масштаба проекта [7]. Часто мегапроекты не достигают ожидаемых результатов из-за неопределенности экономических эффектов и сложности поведения стейкхолдеров [8].

В России мегапроекты служат инструментами социально-экономического развития и рассматриваются как временные центры управления, координирующие действия участников [9, 10]. Согласно концепции технологического развития до 2030 года, они являются механизмами обеспечения технологического суверенитета. Однако их информационное обеспечение остается «лоскутным», что затрудняет сравнение проектов на единой методологической основе [10].

Заметной особенностью мегапроектов является нечеткость целей и перераспределение влияния стейкхолдеров, что приводит к формированию временных центров управления [11, 12]. Участники интерпретируют цели через символы, влияющие на восприятие легитимности проекта [5]. Снижение неопределенностей возможно за счет анализа взаимосвязей между их типами, учета ожиданий и диалога со стейкхолдерами [13].

С точки зрения организационного дизайна мегапроекты – это сложные сети с многослойной структурой.

турой [14–16]. Как адаптивные системы, они обладают свойствами самоорганизации и эмерджентности, где стейкхолдеры адаптируют поведение через сетевое взаимодействие [3]. Различные координационные механизмы создают временные центры управления для решения задач в течение ограниченного времени [17, 18], однако единое понимание их сущности пока отсутствует [17].

Мегапроекты имеют гибкие границы, допускающие взаимозаменяемость внутренних и внешних компонентов, что позволяет создавать различные конфигурации на протяжении жизненного цикла [19, 20]. Для описания их организационного дизайна используется термин «организационные возможности» – совокупность знаний, навыков, ресурсов и процедур для интеграции стейкхолдеров [16, 21, 22]. Неформальные стейкхолдеры могут демонстрировать поведение, используя механизмы координации и адаптации, что приводит к объединению их во временные центры управления и расширяет их влияние [23]. Успех мегапроектов зависит от формы взаимодействия между стейкхолдерами [24].

Объектом исследования являются мегапроекты – крупномасштабные инвестиционные программы, направленные на решение задач социально-экономического развития и требующие значительных ресурсов и времени. Предмет – процессы управления изменениями мегапроектов, обусловленные интеграцией стейкхолдеров в условиях неопределенности внешней среды. Цель – разработка математической модели управления изменениями и интеллектуальной информационной системы для анализа их интенсивности.

Исследование решает бизнес-проблему, связанную с фундаментальными проблемами управления мегапроектами [6, 8]: превышение бюджетов и сроков, неполнота достижения результатов, сложность координации стейкхолдеров. Эти проблемы обусловлены высокой неопределенностью внешней среды, сложным взаимодействием участников и интересующими факторами. Управление изменениями мегапроектов рассматривается как «мерзкая» проблема (wicked problem), для которой характерны: отсутствие однозначного решения, зависимость от контекста и участников, необходимость учета множества мнений.

Традиционные методы анализа изменений проектов имеют ограничения: PERT/CPM игнорируют взаимодействие стейкхолдеров, Earned Value

Management (EVM) плохо адаптируется к неопределенности, IBM Rational Focal Point и SAP Portfolio and Project Management ограничены в анализе временных центров управления и больших объемов данных.

Основным результатом исследования является прототип информационной системы, включающий: математическую модель управления изменениями в векторно-матричной форме; методику нейросетевого анализа на основе большой языковой модели Qwen 2.5-Plus (Alibaba Cloud); программный интерфейс для загрузки документов, автоматической обработки данных. Прототип позволяет анализировать взаимодействие стейкхолдеров, оценивать интенсивность изменений и прогнозировать последствия на основе исторических данных.

Гипотеза исследования: интеграционная активность стейкхолдеров приводит к формированию временных центров управления изменениями (ВЦУИ), динамика интеграции которых определяет интенсивность и направленность изменений мегапроекта, а успех реализации зависит от способности ключевых стейкхолдеров формировать устойчивые кооперационные связи.

## 1. Методы исследования

Проведен комплексный анализ научной литературы по управлению мегапроектами, выявлены ключевые проблемы: низкая эффективность координации стейкхолдеров, сложность прогнозирования изменений во внешней среде, конфликты интересов и формирование ВЦУИ.

Для получения эмпирических данных выполнены:

1. Сбор первичной информации: интервью с руководителями проектов и участие в конференциях.
2. Анализ документов мегапроектов, практики взаимодействия стейкхолдеров и особенностей формирования ВЦУИ.
3. Проверка эффективности нейросетевого анализа на реальных документах и сравнение с традиционными методами.

Результаты подтвердили актуальность исследования и позволили конкретизировать задачи разработки новых подходов к управлению изменениями. Исследование включало два этапа.

1. Разработка математической модели управления изменениями и информационной системы нейросетевого анализа.
2. Ретроспективный нейросетевой анализ изменений мегапроекта «Северный поток – 2».

В данном исследовании «стейкхолдеры мегапроекта» – это все организации и лица, влияющие на проект, включая официальных участников и внешние стороны. Под управлением понимаются любые воздействия стейкхолдеров, изменяющие процесс реализации проекта.

Анализ стейкхолдеров дополнен критерием «Интеграционная активность», под которой понимается инициатива по координации с другими участниками для достижения их целей. Глубокая интеграция возможна при наличии формальных или неформальных полномочий, признаваемых другими стейкхолдерами. Результатом интеграции является формирование ВЦУИ, влияющих на реализацию и результаты мегапроекта.

### 1.1. Математическая модель управления изменениями мегапроекта

В рамках методического аппарата теории управления и теории организационных изменений процесс управления мегапроектом может быть описан векторно-матричной математической моделью динамической системы с отрицательной обратной связью по результатам изменений (рис. 1).

Изменения внешней среды ЕХТ актуализируют вектор  $G$  целей проекта, сопоставление которого с вектором результатов очередного этапа  $R_c$  формирует вектор рассогласования:

$$D = G - R_c + N.$$

Вектор  $D$  играет роль вектора оперативных задач управления изменениями проекта. Под интенсивностью изменений мегапроекта понимается степень трансформации его актуальных целей и структуры взаимодействия стейкхолдеров в ответ на изменения факторов внешней среды.

Матрица интенсивности изменений  $Q$  ( $s \times g$ ), является результатом матричного произведения:

$$Q = AP,$$

где  $A$  – симметричная квадратная матрица ( $s \times s$ ) степеней попарной интеграции стейкхолдеров:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{s1} & \dots & a_{ss} \end{bmatrix},$$

$P$  – матрица ( $s \times g$ ) степеней влияния стейкхолдеров на достижение актуальных целей проекта:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1g} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{s1} & \dots & p_{sg} \end{bmatrix}.$$

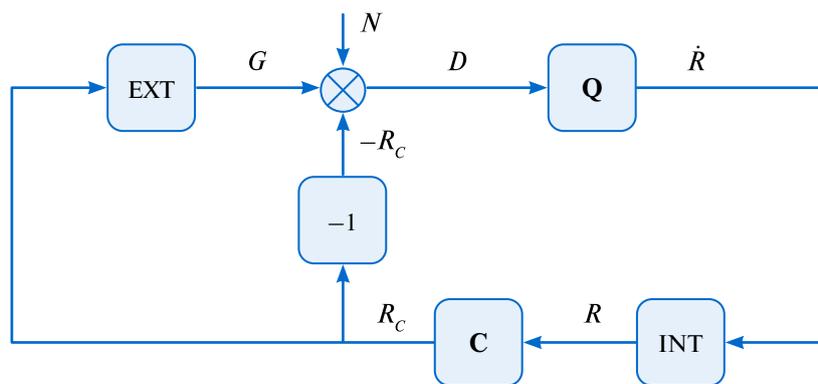


Рис. 1. Схема математической модели управления изменениями мегапроекта<sup>1</sup>.  
Источник: разработано автором.

<sup>1</sup> Здесь и далее матрицы обозначаются заглавными буквами полужирного начертания, в скобках указываются размерности матриц, векторы обозначаются заглавными буквами курсивом (под вектором понимается вектор-столбец).

Матрица  $Q$  показывает, насколько каждый стейкхолдер, действуя на достижение целей проекта, вовлекает других стейкхолдеров в решение задач.

Для оценки степени интеграции стейкхолдеров в матрице  $A$  используется шкала от 0 до 1, где 0 – отсутствие интеграции, 1 – максимальное взаимодействие. Элементы главной диагонали отражают степень самоорганизации стейкхолдера и могут быть меньше единицы, если стейкхолдер представляет группу участников, не использующих формы максимальной координации.

Формы интеграции стейкхолдеров ранжируются по степени координации (таблица 1).

Анализ матрицы  $A$  позволяет выявлять ВЦУИ для оценки их роли в достижении целей проекта на каждом этапе. В матрице  $P$  степень влияния стейкхолдера оценивается по шкале от 0 до 1 (от полного отсутствия до максимального потенциала). В зависимости от роли стейкхолдера его потенциал может быть направлен как на поддержку, так и на противодействие целям проекта.

Для анализа интенсивности изменений формируется нормированная матрица

$$Q_N = \frac{100}{\sum_i \sum_j |q_{ij}|} Q,$$

где  $q_{ij}$  – элементы матрицы  $Q$ .

Нормировка матрицы  $Q_N$  обеспечивает равенство суммы ее элементов 100%, где каждый элемент показывает процентную долю интенсивности изменений, вызванных влиянием стейкхолдера с учетом его взаимодействия с другими стейкхолдерами. Умножение вектора  $D$  слева на матрицу  $Q$  дает  $s$ -мерный вектор  $\dot{R}$ , описывающий скорость изменений проекта, вызванных действиями стейкхолдеров.

$$\dot{R} = QD.$$

Элемент  $\int R$  (интеграл) описывает формирование  $s$ -мерного вектора кумулятивных результатов изменений проекта:

$$R(t) = \int_{t_0}^t \dot{R}(t) dt.$$

Введем контрольную матрицу  $C$  ( $g \times s$ ), позволяющую сопоставлять кумулятивные результаты проекта с его целями:

$$C(t) = \mu Q^T,$$

где  $\mu$  – коэффициент динамики устранения рассогласования;

$T$  – знак транспонирования.

Умножение вектора  $R$  слева на  $C$  дает  $g$ -мерный вектор  $R_C = CR$ , отражающий кумулятивные результаты, соотнесенные с целями проекта. Этот

Таблица 1.

Формы интеграции стейкхолдеров

Степень интеграции	Форма интеграции	Пояснения
0,0–0,2	Независимое управление (отсутствие интеграции)	Стейкхолдеры работают независимо друг от друга, без согласования решений и взаимодействия
0,2–0,4	Координация (слабая интеграция)	Стейкхолдеры регулярно обмениваются информацией и согласовывают планы, но каждый остается ответственным за свою часть работы
0,4–0,6	Сотрудничество (средняя интеграция)	Стейкхолдеры сотрудничают для достижения целей проекта, проводят регулярные встречи и совещания, используют общие инструменты и платформы
0,6–0,8	Объединение (высокая интеграция)	Стейкхолдеры работают в тесной взаимосвязи, создают рабочие группы и команды, принимают совместные решения и разрабатывают стратегии
0,8–1,0	Консолидация (максимальная интеграция)	Все аспекты проекта полностью интегрированы, стейкхолдеры имеют единый центр управления и контроля, используют единые стандарты и процессы

вектор влияет на внешнюю среду проекта ЕХТ и используется для сопоставления с вектором целей  $G$ . Матрица  $C$  согласует размерности векторов  $R_c$ ,  $G$ ,  $N$  и  $D$  по числу целей проекта.

Важным аспектом моделирования является вектор ошибок  $N$ , вызванных неопределенностью внешней среды и неточностью оценки результатов стейкхолдерами. Модель с отрицательной обратной связью позволяет анализировать влияние интенсивности изменений на соответствие результатов целям проекта (вектор  $D$ ). Вектор  $N$  моделировался как совокупность равномерно распределенных случайных величин, центрированных относительно переменных вектора  $V$ , с дисперсией, соответствующей экспертной оценке информационной неопределенности внешней среды.

Стохастическая модель позволяет оптимизировать интенсивность изменений путем минимизации математического ожидания и стандартного отклонения вектора рассогласования  $D$ . Оптимальная интенсивность зависит от скорости изменений внешней среды и уровня информационной неопределенности. Увеличение темпов изменений внешней среды требует повышения интенсивности управления для улучшения адаптивности, но рост неопределенности снижает необходимость интеграции стейкхолдеров [25]. Искусственное усиление интеграции стейкхолдеров может отклонить прогресс проект от плана, увеличивая дисперсию рассогласований и снижая прогнозируемость результатов. Однако недостаточная интенсивность изменений в условиях динамичной внешней среды приводит к отклонению математического ожидания траектории проекта от запланированной.

В данной модели динамика изменения цели в зависимости от динамики факторов внешней среды моделировалась выражением

$$g = \alpha_1 + \alpha_2 \sin(2\pi\alpha_3 t),$$

где  $g$  – элемент вектора  $G$ ;

$\alpha_1$  – коэффициент смещения по оси ординат, принимающий условные значения 1, 2, 3 и 4 по числу целей каждого этапа;

$\alpha_2$  – амплитуда изменения;

$\alpha_3$  – коэффициент частоты изменений, величина которого равна экспертной оценке степени дина-

мики внешней среды, в условиях которых ставилась данная цель;

$t$  – момент времени – шаг формирования результатов изменения в течение одного этапа проекта.

Процесс формирования ВЦУИ описывается следующим образом:

1. Формирование начинается при достижении порога интеграции:

$$a_{ij} > \alpha,$$

где  $a_{ij}$  – элемент матрицы интеграции  $A$  – степень взаимодействия между стейкхолдерами  $i$  и  $j$ ;

$\alpha$  – пороговое значение (принималось равным 0,5).

2. Группа стейкхолдеров классифицируется как ВЦУИ при выполнении условия:

$$\sum_{j=1}^s a_{ij} > \beta \text{ для всех } i \in \text{ВЦУИ},$$

где  $\beta$  – минимальная суммарная степень интеграции для участников ВЦУИ (принималась равной 2).

3. Сила влияния ВЦУИ определяется как:

$$p_{\text{ВЦУИ}} = \sum_{i,j \in \text{ВЦУИ}} a_{ij} \cdot p_{ij}.$$

Динамика развития ВЦУИ описывается изменением ключевых параметров во времени:

1. Изменение интеграции описывается уравнением:

$$\frac{da_{ij}(t)}{dt} = f(a_{ij}(t), p_i(t), p_j(t), n(t)),$$

где  $f$  – функция, учитывающая текущую степень интеграции, потенциал влияния стейкхолдеров и уровень информационной неопределенности.

2. Адаптация к внешним условиям:

$$g_i(t+1) = g_i(t) + \gamma \cdot c_{ij}(t) \cdot (g_i(t) - r_i(t)),$$

где  $\gamma$  – коэффициент скорости адаптации.

3. Распад ВЦУИ происходит при  $a_{ij}(t) < \delta$  или значительном росте информационной неопределенности  $n(t) > \varepsilon$ , где  $\delta$  и  $\varepsilon$  – пороговые значения для интеграции и неопределенности соответственно.

4. Новые ВЦУИ формируются при:

$$a_{ij}(t) > \alpha \text{ и } \sum_{j=1}^s a_{ij} > \beta.$$

### Методы анализа эволюции ВЦУИ:

#### 1. Кластеризация стейкхолдеров:

$$\text{Кластер } k = \{i | a_{ij} > \alpha_k \quad \forall j \in \text{кластер } k\}.$$

#### 2. Определение ключевых параметров сети взаимодействия:

а) центральность стейкхолдера<sup>2</sup>:

$$c_i = \sum_{j=1}^s a_{ij},$$

б) коэффициент кластеризации:

$$\phi_i = \frac{\sum_{j,k} a_{ij} \cdot a_{ik} \cdot a_{jk}}{\sum_{j,k} a_{ij} \cdot a_{ik}}.$$

#### 3. Оценка жизненного цикла ВЦУИ:

а) средняя степень интеграции:

$$\bar{a}_k(t) = \frac{1}{|k|} \sum_{i,j \in k} a_{ij}(t).$$

б) суммарное влияние:

$$p_k(t) = \sum_{i \in k} p_i(t).$$

Использование математической модели управления изменениями мегапроекта в информационной системе должно отвечать на ключевые вопросы:

1. Какова степень их интеграции на каждом этапе? Какие факторы влияют на изменения уровня интеграции?
2. Какие ВЦУИ формируются в процессе реализации проекта? Каковы их роль и характер взаимодействия?
3. Какова общая интенсивность изменений? Как соотносятся позитивные и негативные изменения?
4. Как скорость изменений и информационная неопределенность сказываются на управлении проектом?
5. Каков уровень рассогласования между целями и результатами? Какие факторы влияют на его динамику?
6. Как изменения активности стейкхолдеров повлияют на будущие результаты? Какие возможны сценарии развития?

7. Какой уровень интенсивности изменений оптимален? Как минимизировать влияние неопределенности?

8. Как модель реагирует на ошибки оценки и изменения входных данных?

Таким образом, разработанная математическая модель отличается от традиционных моделей следующими особенностями:

1. Учет стейкхолдеров: введено понятие «интеграционной активности стейкхолдеров», позволяющее описать механизмы формирования ВЦУИ; матрица интеграции **A** количественно оценивает взаимодействие групп стейкхолдеров [12, 18].
2. Детализация обратной связи: используется механизм отрицательной обратной связи по результатам изменений, что адекватно описывает корректировку целей на основе фактических результатов [3, 4].
3. Оценка интенсивности изменений: интенсивность определяется через матричное произведение **A** и **P**; учет знаков элементов матрицы **Q** обеспечивает полноту анализа изменений [3, 21, 23].
4. Учет неопределенности: вектор ошибок *N* моделирует информационную неопределенность, позволяя исследовать поведение системы при разных уровнях сложности [13].
5. Новая интерпретация переменных: вектор *D* рассматривается как оперативная задача управления; контрольная матрица **C** сопоставляет кумулятивные результаты с целями, что важно для долгосрочных проектов.
6. Специфика мегапроектов: динамика целей моделируется периодической функцией, отражающей длительные сроки реализации; интеграция учитывает сложные взаимоотношения участников [19, 23].
7. Оптимизация изменений: учет взаимосвязи между скоростью изменения внешней среды, информационной неопределенностью и интенсивностью изменений позволяет адаптировать управление проектами к меняющимся условиям [25].
8. Практическая применимость: модель разработана с учетом реальных мегапроектов, например, таких как «Северный поток – 2».

<sup>2</sup> «Центральность стейкхолдера» — это количественный показатель их важности, влияния или роли в сети взаимодействия.

Эти особенности обеспечивают точное описание процессов управления изменениями в мегапроектах и практическую применимость модели.

### **1.2. Интеллектуальная информационная система и методика ретроспективного нейросетевого анализа интенсивности изменений мегапроектов**

Целью ретроспективного нейросетевого анализа является систематизация информации о мегапроекте и получение числовых оценок для расчета интенсивности изменений и роли ВЦУИ. Термин «ретроспективный» подразумевает анализ завершенного проекта, а «нейросетевой» указывает на использование большой языковой модели – искусственной нейросети трансформерного типа, построенной на технологии машинного обучения.

Методика основана на использовании большой языковой модели Qwen 2.5-Plus (свободная лицензия) и реализована через API Qwen Cloud. Программный интерфейс разработан на Python 3.10. Основные характеристики системы представлены в *Приложении 1*, алгоритм обработки данных и генерации оценок – в *Приложении 2*.

Исходные данные включали документы, содержание информацию о стейкхолдерах, целях, бюджете, сроках и других аспектах мегапроекта. Источники: открытые паспорта проектов, ТЭО, научные статьи, официальные сайты организаций, статистические отчеты и отраслевые обзоры.

Пользовательский запрос к модели формируется для получения информации об этапах, стейкхолдерах, целях проекта и числовых оценок матриц и векторов. Для повышения достоверности использовались шаблоны промпт-инжиниринга (*Приложение 3*).

Адекватность сгенерированного контента зависит от выбора модели, способной обрабатывать текстовые и числовые данные; качества исходных данных; эффективности запроса, построенного на принципах промпт-инжиниринга; аналитической и статистической обработки выходных данных.

Для повышения качества результатов применялась процедура последовательной статистической обработки числовых оценок. В рамках одного се-

анса модель поэтапно обрабатывала пакет документов, расширяя информационную базу проекта. После загрузки очередного документа модель генерировала промежуточные оценки с учетом предыдущих шагов. Этот подход позволил обойти ограничения интерфейса по объему загружаемых файлов и повысить точность оценок за счет последовательной статистической обработки данных и оценки среднего арифметического и стандартного отклонения результатов. Количество шагов определялось доступным объемом документов и необходимостью достижения сходимости средних значений и стабилизации отклонений.

### **2. Результаты ретроспективного интеллектуального анализа процесса изменений мегапроекта «Северный поток – 2»**

Информационная база исследования включала 63 документа (2011–2024 гг.): публикации в СМИ (РБК, ТАСС, Financial Times и др.), научные статьи (ELibrary, Scopus, Web of Science) и данные с официальных сайтов (ПАО «Газпром», Nord Stream 2 и др.). Числовые оценки уточнялись по восьми шагам загрузки документов путем объединения файлов.

В *таблице 2* приведен список ключевых стейкхолдеров проекта, сформированный по результатам нейросетевого анализа текстовых данных.

Генеральная цель проекта «Северный поток – 2» – диверсификация маршрутов поставок газа, устранение транзитных рисков, удовлетворение растущего спроса европейских стран на энергоресурсы и укрепление энергетической безопасности континента. Проект имеет исключительно коммерческий характер<sup>3</sup>.

*Таблица 3* содержит перечень ключевых целей проекта по этапам с экспертными оценками динамики изменения ( $V$ ) и информационной неопределенности ( $N$ ) внешней среды, влияющих на постановку целей.

В *Приложении 4* представлены матрицы интеграции стейкхолдеров по этапам проекта, построенные с использованием методики нейросетевого

<sup>3</sup> Сформулировано на основе: Лавров назвал цель проекта «Северный поток – 2» // РИА «Новости» (официальный сайт), 28.08.2018 (обновлено 03.03.2020). [Электронный ресурс]: <https://ria.ru/20180828/1527333450.html?ysclid=m3ic7exqtj972069035> (дата обращения 15.11.2024).

Таблица 2.

## Ключевые стейкхолдеры проекта «Северный поток – 2»

Код	Стейкхолдер	Пояснение
S1	ПАО «Газпром»	Инициатор и основной бенефициар проекта, стремящийся увеличить экспорт газа и снизить транзитные риски. Рассматривается в модели с учетом роли и деятельности компании Nord Stream 2 AG, единственным акционером которой является ПАО «Газпром».
S2	Европейские энергетические компании	Инвесторы и партнеры проекта, заинтересованные в стабильных поставках газа и прибыли от участия в проекте: Uniper SE (Германия), Wintershall Dea GmbH (Германия), OMV AG (Австрия), Engie SA (Франция), Royal Dutch Shell (Нидерланды).
S3	Правительство России	Поддерживает проект в интересах обеспечения доходов от экспорта газа и ускорения социально-экономического развития России.
S4	Правительство Германии	Изначально поддерживало проект, рассматривая его как экономически выгодный, но позже изменило свою позицию под давлением США.
S5	Правительства транзитных стран	Противники проекта, опасющиеся потери доходов от транзита газа и усиления российского влияния.
S6	Правительство США	Активный противник проекта, рассматривающий его как угрозу энергетической безопасности Европы и инструмент российского влияния. Вводило санкции против компаний, участвующих в строительстве.
S7	Экологические организации	Выступали против проекта, выражая опасения по поводу его воздействия на окружающую среду Балтийского моря.
S8	Правительства стран Балтийского региона	Имеет смешанное отношение к проекту: часть населения поддерживает его из-за потенциальных экономических выгод, другая – опасается экологических рисков и геополитических последствий.
S9	Потребители газа в Европе	Заинтересованы в стабильных и доступных поставках газа, но также обеспокоены наличием мнения части политиков о возможной зависимости от России.

анализа. Анализ их структуры выявил два ВЦУИ:

- ♦ ВЦУИ-1: S1–S4 («Газпром», европейские компании, Россия, Германия) – устойчивая интеграция на первых трех этапах и распад на четвертом;
- ♦ ВЦУИ-2: S5–S8 (транзитные страны, США, экологические организации, страны Балтийского региона) – рост интеграции по этапам проекта.

Примеры эволюции ВЦУИ:

ВЦУИ-1 (S1–S4):

- ♦ формирование: высокая начальная интеграция ( $a_{ij} > 0,8$ ) и общие цели по реализации проекта;
- ♦ развитие: стабильное существование на первых трех этапах благодаря поддержке ключевых стейкхолдеров;
- ♦ распад: значительное снижение интеграции на четвертом этапе из-за изменения политической

конъюнктуры ( $a_{ij} < 0,4$ ).

ВЦУИ-2 (S5–S8):

- ♦ формирование: постепенный рост интеграции ( $a_{ij} > 0,4$  к третьему этапу) в ответ на усиление противодействия проекту;
- ♦ развитие: усиление кооперации между противниками проекта ( $a_{ij} > 0,7$  к четвертому этапу);
- ♦ текущее состояние: сохранение высокого уровня интеграции даже после остановки проекта.

Графики динамики интеграции этих ВЦУИ по этапам проекта образуют «ножницы интеграции» (рис. 2).

К примерам наиболее наглядной динамики интеграции по этапам проекта можно отнести следующие пары стейкхолдеров (рис. 3):

- ♦ S1/S4: «Газпром», Германия – спад и резкий

Таблица 3.

**Ключевые цели по этапам проекта с оценками динамики изменения  
и информационной неопределенности внешней среды<sup>4</sup>**

Этап проекта	Ключевые цели	V	N	Комментарий
Этап 1. Концепция и планирование (2011–2015 гг.)	G1.1. Планирование удвоения объемов поставок газа в Европу по сравнению с проектом «Северный поток».	0,22 (0,05)	0,31 (0,04)	Рост потребления газа в Европе был относительно предсказуем, хотя и подвержен колебаниям.
	G1.2. Формирование концепции снижения зависимости поставок от транзитных стран.	0,73 (0,06)	0,64 (0,06)	Политическая ситуация в транзитных была нестабильной, что создавало риски для поставок. Высокая динамика и неопределенность.
	G1.3. Формирование концепции энергетической безопасности Европы.	0,50 (0,03)	0,44 (0,05)	Концепция энергобезопасности Европы обсуждалась, но ее конкретное содержание и отношение к «Северному потоку-2» были неоднозначны.
	G1.4. Планирование привлечения европейских инвестиций и партнеров.	0,43 (0,10)	0,53 (0,05)	Интерес европейских компаний к проекту был, но позиция отдельных стран и ЕС в целом была не до конца ясна.
Этап 2. Подготовка и начало строительства (2015–2018 гг.)	G2.1. Получение необходимых разрешений и согласований.	0,60 (0,09)	0,72 (0,04)	Процесс получения разрешений и согласований в разных юрисдикциях был сложным и длительным, с высокой степенью неопределенности.
	G2.2. Заключение контрактов с подрядчиками и поставщиками.	0,27 (0,11)	0,19 (0,12)	Заключение контрактов с подрядчиками – относительно стандартная процедура, хотя и с определенными рисками.
	G2.3. Финансирование проекта.	0,52 (0,08)	0,60 (0,07)	Привлечение финансирования зависело от политических факторов и санкционных рисков, что создавало неопределенность.
	G2.4. Начало строительства морского участка трубопровода.	0,33 (0,10)	0,35 (0,07)	Технические сложности строительства морского участка были предсказуемы и управляемы.
Этап 3. Активная фаза строительства и усиление санкционного давления (2018–2021 гг.)	G3.1. Завершение строительства трубопровода, несмотря на санкции США.	0,90 (0,04)	0,81 (0,07)	Санкционное давление США постоянно усиливалось, создавая высокую динамику и неопределенность для завершения проекта.
	G3.2. Минимизация влияния санкций на сроки и стоимость проекта.	0,80 (0,11)	0,72 (0,10)	Поиск путей минимизации влияния санкций был сложной задачей с высокой степенью неопределенности.
	G3.3. Сертификация и запуск трубопровода.	0,70 (0,05)	0,83 (0,09)	Сертификация и запуск проекта столкнулись с политическим давлением и регуляторными препятствиями, что создавало высокую неопределенность.
	G3.4. Поддержание диалога с европейскими партнерами и регуляторами.	0,81 (0,08)	0,92 (0,07)	Политический диалог в условиях санкций и меняющейся геополитической обстановки был крайне сложным и непредсказуемым.
Этап 4. Остановка проекта и геополитические последствия (2022–н.в.)	G4.1. Сохранение инфраструктуры проекта «Северный поток – 2».	0,20 (0,09)	0,72 (0,06)	Сохранение инфраструктуры технически возможно, но будущее проекта остается неопределенным.
	G4.2. Оценка ущерба и поиск возможных вариантов использования трубопровода.	0,13 (0,06)	0,90 (0,05)	Варианты использования трубопровода в условиях геополитической нестабильности крайне неопределенны.
	G4.3. Минимизация финансовых потерь.	0,52 (0,10)	0,81 (0,08)	Оценка и минимизация финансовых потерь затруднена из-за неопределенности будущего проекта.
	G4.4. Анализ и извлечение уроков.	0,12 (0,07)	0,20 (0,05)	Анализ и извлечение уроков – внутренний процесс, относительно независимый от внешних факторов.

<sup>4</sup> Показано среднее значение и доверительный интервал по Стьюденту (95%) оценок шести экспертов.

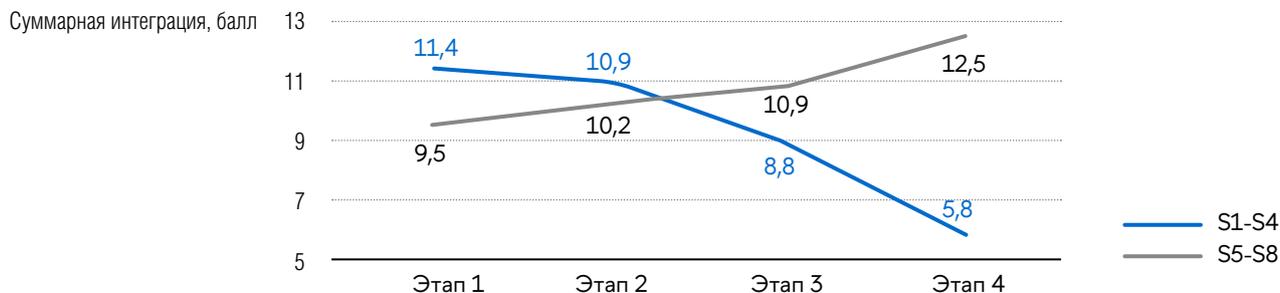


Рис. 2. «Ножницы» интеграции двух групп стейкхолдеров, баллы.

спад на последнем этапе;

- ◆ S3/S4: Россия, Германия – спад и резкий спад на последнем этапе;
- ◆ S4/S6: Германия, США – спад на первых трех и резкий рост «взаимопонимания» на последнем этапе;
- ◆ S5/S6: транзитные страны, США – постоянный рост;
- ◆ S1/S9: «Газпром», потребители – заметный спад.

В *Приложении 5* представлены матрицы силы влияния стейкхолдеров на цели проекта по этапам, полученные методом нейросетевого анализа. Отрицательные значения указывают на негативное влияние, направленное на противодействие достижению целей.

На *рис. 4* показано соотношение величин интеграции, общего и негативного влияния стейкхолдеров по этапам проекта (в баллах).

Снижение интеграции сопровождалось спадом

абсолютного значения влияния стейкхолдеров. Негативное влияние стало наиболее заметным на втором и третьем этапах проекта.

В *Приложении 6* приведены матрицы интенсивности изменений проекта по этапам. Отрицательные значения соответствуют интенсивности негативных изменений. На *рис. 5* показаны суммарные абсолютные значения общей интенсивности изменений (в баллах) и процент интенсивности негативных изменений по этапам проекта.

Максимально интенсивными изменения были на для первых двух этапах проекта при минимуме негативных изменений на первом из них. На третьем этапе на противодействие проекту были направлены почти 46% всех изменений.

На *рис. 6* показана динамика генерирования общих и негативных изменений описанными ВЦУИ.

На первом этапе ВЦУИ-1 сгенерировал около 75% позитивных изменений, тогда как на третьем этапе ВЦУИ-2 вызвал более 46% изменений, прак-

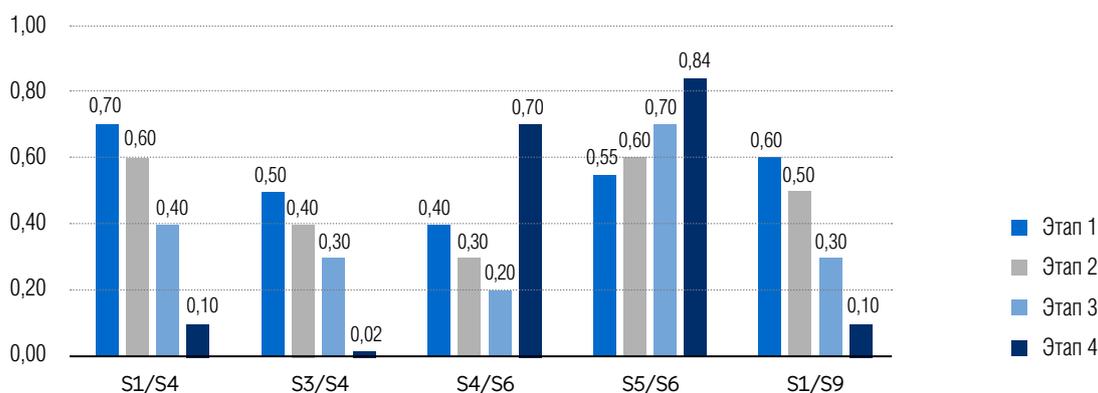


Рис. 3. Примеры динамики интеграции выбранных пар стейкхолдеров по этапам проекта.

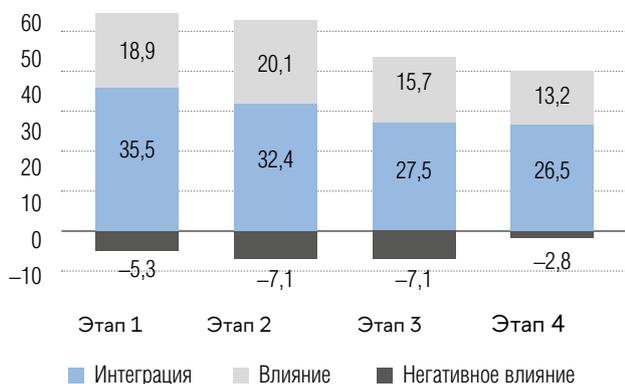


Рис. 4. Интеграция, общее и негативное влияние по этапам проекта, баллы.

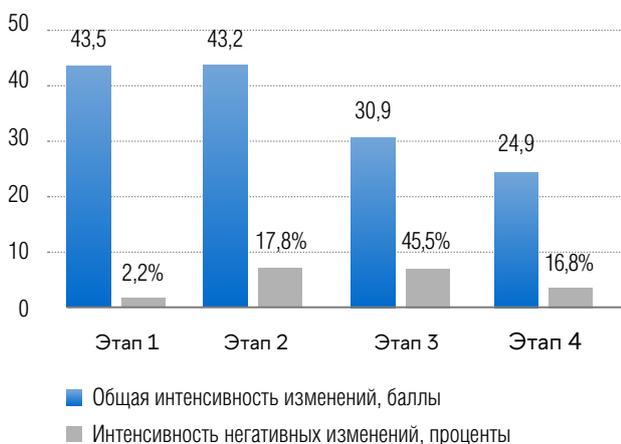


Рис. 5. Интенсивности изменений и процент негативных изменений.

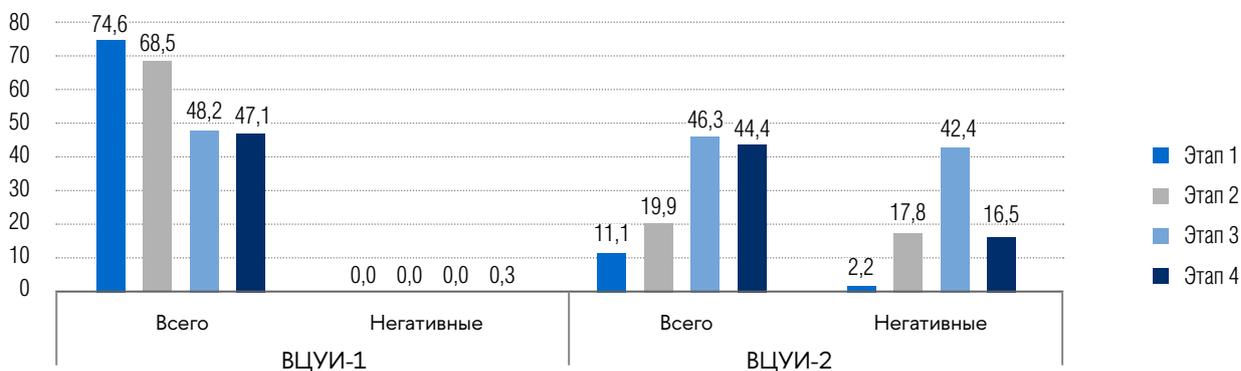


Рис. 6. Динамика генерирования изменений двумя ВЦИ, процент.

тически все из них были направлены на противодействие проекту.

Классификация типов ВЦИ на основе анализа данных проекта «Северный поток – 2»:

А. Стабильные ВЦИ характеризуются высокой степенью интеграции ( $a_{ij} > 0,8$ ) и устойчивостью к изменениям внешней среды (например, ВЦИ-1).

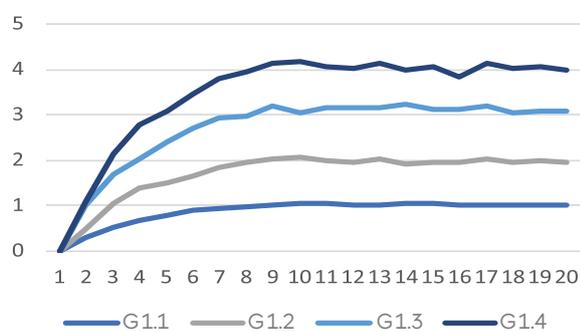
Б. Динамичные ВЦИ имеют среднюю степень интеграции ( $0,4 < a_{ij} < 0,8$ ) и быстро реагируют на изменения внешних условий (например, ВЦИ-2).

В. Транзиторные ВЦИ возникают временно для решения конкретных задач и быстро распадаются после их завершения ( $a_{ij} < 0,4$ ) (например, временные рабочие группы по получению разрешений).

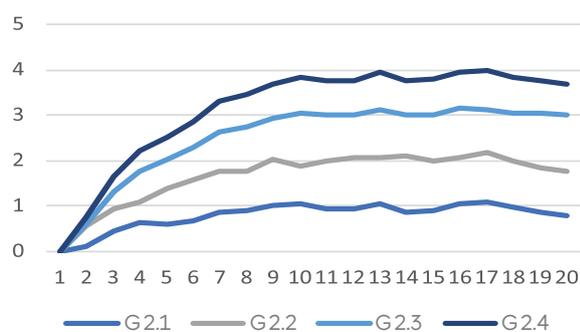
На рис. 7 представлены графики динамики кумулятивных результатов  $R_c$ , построенные на основе матриц **A** и **P**. Ось абсцисс отражает условную длительность этапа, разделенную для наглядности на 20 отрезков. На осях ординат указаны номера целей. Направление смещения кривой  $R_c$  относительно горизонтальной оси показывает степень достижения цели и отклонение от плановых значений.

Согласно результатам моделирования, цели первых двух этапов (концептуальное планирование и подготовка строительства) были достигнуты благодаря ВЦИ-1, несмотря на негативное влияние ВЦИ-2. Экспериментальное моделирование<sup>5</sup> показало, что увеличение интеграции ВЦИ-2 на первом этапе не изменило бы результаты, но максимальное отрицательное влияние этого ВЦИ

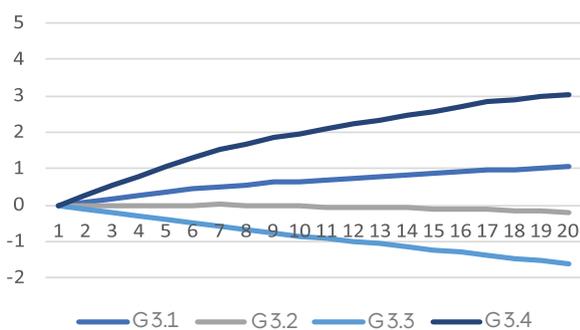
<sup>5</sup> Под экспериментальным моделированием понимается «искусственное» изменение части значений матриц **A** и **P** для выявления характера влияния таких гипотетических ситуаций на кумулятивные результаты  $R_c$ .



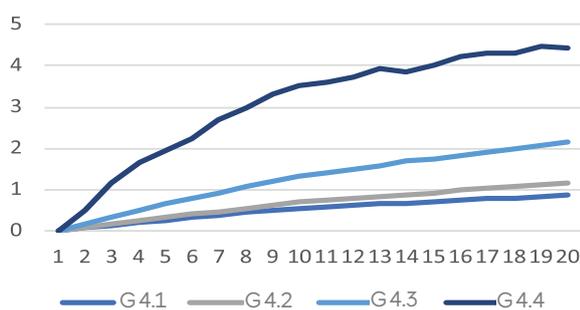
Этап 1.



Этап 2.



Этап 3.



Этап 4.

Рис. 7. Динамика кумулятивных результатов изменения содержания проекта по этапам.

снизило бы динамику достижения целей: снижение зависимости от транзитных стран (G1.2), формирование энергетической безопасности Европы (G1.3), заключение контрактов (G2.2), финансирование (G2.3) и начало строительства (G2.4).

Реализация целей активной фазы строительства столкнулась с ростом санкционного давления: темпы строительства (G3.1) и диалог с регуляторами (G3.4) оказались ниже запланированных. Цели минимизации влияния санкций (G3.2) и сертификации трубопровода (G3.3) не были достигнуты из-за воздействия ВЦУИ-2. Экспериментальное моделирование показало, что максимальная интеграция ВЦУИ-1 помогла бы достичь цели G3.2 и G3.3, тогда как усиление негативного влияния ВЦУИ-2 привело бы к полному срыву целей этого этапа.

Достижение целей оценки геополитических последствий требует времени, при этом анализ и извлечение уроков (G4.4) – ключевая цель текущего этапа. По результатам моделирования, максимальная интеграция ВЦУИ-1 является условием полной реализации всех целей этапа. Снижение интенсивности изменений на третьем и четвертом этапах уменьшает влияние информационного «шума», но увеличивает отклонение результатов от целевых значений [25].

### 3. Обсуждение и выводы

Результаты ретроспективного анализа изменений мегапроекта «Северный поток – 2» согласуются с экспертными оценками и литературными данными, подтверждая адекватность разработанного аналитического аппарата. Они также подтверждают гипотезу о том, что интеграционная активность стейкхолдеров формирует ВЦУИ, влияющие на интенсивность изменений проекта. Динамика интеграции ВЦУИ определяет интенсивность и направленность изменений, а успех реализации мегапроекта зависит от способности ключевых стейкхолдеров создавать устойчивые кооперационные связи.

Предложенная математическая модель и методика нейросетевого анализа позволяют оценивать интенсивность изменений и влияние интеграционной активности стейкхолдеров на реализацию мегапроектов. Результаты исследования могут быть полезны руководителям и участникам проектов, органам власти, а также исследователям в области

управления крупными проектами.

Проведенное исследование выявило границы применимости рациональных методов принятия решений в управлении изменениями мегапроектов:

1. Математическая модель демонстрирует высокую чувствительность к входным параметрам, что типично для «мерзких» проблем.
2. Анализ мегапроекта «Северный поток – 2» показал значительное влияние интересубъективных факторов на динамику изменений.
3. ВЦУИ формировались преимущественно через неформальные механизмы координации и адаптации.

Разработанная интеллектуальная информационная система (IIS) сравнивалась с такими системами, как SAP Portfolio and Project Management (SAP), Total Organizational Risk Engine (TORE), Microsoft Power BI с Azure Machine Learning (MPBI) и IBM Watson Discovery (IBM). Сравнительный анализ проводился группой из пяти экспертов по шкале от 0 до 5.

Критериями сравнения были: время обработки документа (K1), объем данных (K2), учет неопределенности внешней среды (K3), анализ временных центров управления (K4), оценка интенсивности изменений (K5), адаптация к новым данным (K6), удобство интерфейса (K7) и необходимость настройки (K8).

На рис. 8 показано распределение экспертных баллов по информационным системами и критериям.

Согласно экспертизе, разработанная информационная система превосходит другие системы в решении рассмотренных задач.

Разработанные в исследовании математическая модель, информационная система и методика нейросетевого анализа могут использоваться как для ретроспективного анализа завершенных проектов, так и для управления текущими проектами. Основные подходы включают:

1. Прогнозирование и оптимизация динамики ВЦУИ.

Нейросетевой анализ данных прогнозирует формирование и трансформацию ВЦУИ, выявляя конфликты и предлагая превентивные меры. Управление интенсивностью изменений через уровни интеграции стейкхолдеров и учет внешних факто-

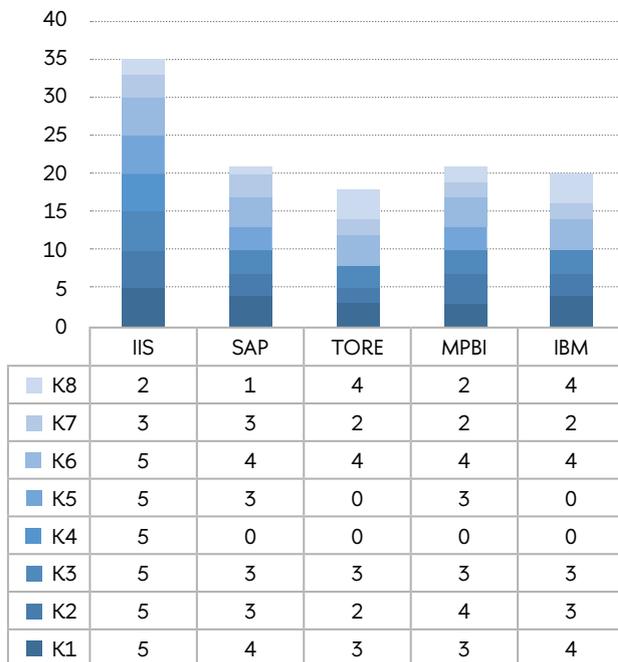


Рис. 8. Экспертные баллы по критериям.

ров помогает избежать как чрезмерной, так и недостаточной активности.

2. Оценка эффективности управления и корректировка стратегии.

Регулярное обновление матриц интеграции и влияния позволяет оценивать работу ВЦУИ, корректировать стратегию управления и адаптировать цели проекта на основе текущих данных и прогнозов.

3. Сценарное моделирование и поддержка принятия решений.

Изменение параметров (интеграция, неопределенность, внешняя среда) в рамках сценарного моделирования помогает оценить последствия решений и выбрать оптимальную стратегию. Интеграция аналитических данных в системы поддержки решений обеспечивает объективную основу для управления.

4. Мониторинг рисков и управление неопределенностью.

Анализ ключевых параметров (матрицы **A**, **P**, **Q**, вектор **D**) позволяет своевременно выявлять риски и предотвращать их развитие. Оценка информационной неопределенности и влияния внешней среды минимизирует риски и повышает адаптивность проекта.

5. Формирование коалиций и взаимодействие со стейкхолдерами.

Анализ возможностей усиления интеграции между ключевыми участниками помогает формировать эффективные коалиции и укреплять диалог со стейкхолдерами для достижения общих целей.

Таким образом, предложенные подходы обеспечивают комплексное управление изменениями, повышая адаптивность и эффективность проектов.

Перспективным направлением исследования является применение методики нейросетевого анализа для сравнения мегапроектов разных типов. Это поможет выявить закономерности динамики ВЦУИ с учетом отраслевой специфики, масштаба, культурного контекста и других факторов. На основе данных, извлеченных нейросетью из мас-

сива документов, можно сформулировать выводы о факторах успеха и неудач мегапроектов, а также разработать универсальные рекомендации по управлению изменениями. ■

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 225013004474-0 «Разработка методов и инструментов мультимедальной бизнес-аналитики»).

Автор благодарит анонимного рецензента за ценные замечания и рекомендации, которые способствовали улучшению качества статьи, а также экспертов, принявших участие в сравнительном анализе информационных систем.

### Литература

1. Абдикеев Н.М., Богачев Ю.С., Бекулова С.Р. Институциональные механизмы обеспечения научно-технологического прорыва в экономике России // *Управленческие науки*. 2019. №9(1). С. 6–19. <https://doi.org/10.26794/2404-022A-2019-9-1-6-19>
2. Митрофанова И.В., Жуков А.Н., Батманова В.В., Митрофанова И.А. Мегапроекты развития территорий: опыт Соединенных штатов Америки и Российской Федерации // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2014. № 31(268). С. 28–40.
3. Daniel E., Daniel P.A. Megaprojects as complex adaptive systems: The Hinkley point C case // *International Journal of Project Management*. 2019. Vol. 37. No. 8. P. 1017–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2019.05.001>
4. Gil N.A. Cracking the megaproject puzzle: A stakeholder perspective? // *International Journal of Project Management*. 2023. Vol. 41. No. 3. Article 102455. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102455>
5. Floricel S., Brunet M. Grandstanding? The elusive process of shaping megaproject symbolism // *International Journal of Project Management*. 2023. Vol. 41. No. 5. Article 102498. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102498>
6. Flyvbjerg B. What you should know about megaprojects and why: An overview // *Project Management Journal*. 2014. Vol. 45. No. 2. P. 6–19. <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>
7. Baerenbold R. Reducing risks in megaprojects: The potential of reference class forecasting // *Project Leadership and Society*. 2023. Vol. 4. Article 100103. <https://doi.org/10.1016/j.plas.2023.100103>
8. *Megaproject management: A multidisciplinary approach to embrace complexity and sustainability*. (Eds.: E. Favari, F. Cantoni). Springer Cham, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39354-0>
9. Гусев А.Б., Юревич М.А. Государственная система управления мегапроектами как модель восстановления национального суверенитета // *Вопросы теоретической экономики*. 2022. № 3. С. 62–76.
10. Балацкий Е.В., Екимова Н.А. Феномен мегапроектов в модели многоконтурной экономики // *Вопросы регулирования экономики*. 2021. Т. 12. № 4. С. 25–39. <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2021.12.4.025-039>
11. Bourne M., Bosch-Rekveltd M., Pesämaa O. Moving goals and governance in megaprojects // *International Journal of Project Management*. 2023. Vol. 41. Article 102486. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102486>
12. Jiang K., Le P., Zheng A., Zhang A., Ouyang L. Toward a systematic understanding of megaproject improvisation // *International Journal of Project Management*. 2023. Vol. 41. Article 102529. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102529>
13. Machiels T., Compennolle T., Coppens T. Stakeholder perceptions of uncertainty matter in megaprojects: The Flemish A102 infrastructure project // *International Journal of Project Management*. 2023. Vol. 41. Article 102437. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102437>
14. Martinsuo M., Ahola T. Supplier integration in complex delivery projects: Comparison between different buyer-supplier relationships // *International Journal of Project Management*. 2010. Vol. 28. No. 2. P. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.09.004>
15. Sun J., Zhang P. Owner organization design for mega industrial construction projects // *International Journal of Project Management*. 2011. Vol. 29. No. 7. P. 828–833. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.04.005>

16. Zani C.M., Denicol J., Broyd T. Organisation design in megaprojects: A systematic literature review and research agenda // International Journal of Project Management. 2024. Vol. 42. No. 6. Article 102634. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2024.102634>
17. Burton R.M., Obel B. The science of organizational design: Fit between structure and coordination // Journal of Organization Design. 2018. Vol. 7. Article 5. <https://doi.org/10.1186/s41469-018-0029-2>
18. Bakker R.M. Taking stock of temporary organizational forms: A systematic review and research agenda // International Journal of Management Reviews. 2010. Vol. 12. No. 4. P. 466–486. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2010.00281.x>
19. Denicol J., Davies A., Pryke S. The organizational architecture of megaprojects // International Journal of Project Management. 2021. Vol. 39. No. 4. P. 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2021.02.002>
20. Satheesh S.A., Verweij S., van Meerkerk I., Busscher T., Arts J. The impact of boundary spanning by public managers on collaboration and infrastructure project performance // Public performance & management review. 2023. Vol. 46. No. 2. P. 418–444. <https://doi.org/10.1080/15309576.2022.2137212>
21. Denicol J., Davies A. The Megaproject-based firm: Building programme management capability to deliver megaprojects // International Journal of Project Management. 2022. Vol. 40. No. 5. P. 505–516. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2022.06.002>
22. Offenbeek M.A.G., Vos J.F.J. An integrative framework for managing project issues across stakeholder groups // International Journal of Project Management. 2016. Vol. 34. No. 1. P. 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.09.006>
23. Morkan B., Bertels H.M.J., Sheth A., Holahan P.J. Building megaproject resilience with stakeholders: The roles of citizenship behavior and critical transition mechanisms // International Journal of Project Management. 2023. Vol. 41. No. 5. Article 102485. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102485>
24. Jayasuriya S., Zhang G., Pang R.J. Towards successful economic infrastructure partnership project delivery through effective stakeholder management // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2024. Vol. 26. Article 101173. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101173>
25. Михненко П.А. Оптимизация процесса адаптации хозяйственной организации к изменениям внешней среды // Проблемы управления. 2009. № 4. С. 32–38.

*Приложение 1.*

### Основные характеристики разработанной информационной системы

Категория	Характеристики
Архитектура системы	Клиент-серверная архитектура с облачным развертыванием. Веб-интерфейс для взаимодействия с конечными пользователями. API-шлюз для интеграции с внешними системами.
Конфигурация API	Методы доступа: POST-запросы для передачи промптов и получения ответов. Лимиты запросов установлены ограничения на количество запросов в секунду (QPS) для стабильной работы системы. Формат входных и выходных данных: JSON.
Модуль загрузки и обработки документов	Поддержка форматов DOCX, PDF, TXT, CSV. Автоматическая конвертация в UTF-8. Извлечение ключевых метаданных.
Модуль анализа данных	Реализация математической модели управления изменениями. Применение нейросетевой модели для генерации числовых оценок. Последовательная статистическая обработка результатов.
Модуль визуализации результатов	Построение графиков динамики интеграции стейкхолдеров. Генерация отчетов в формате HTML.
Технические характеристики	Платформа: Python 3.10. Библиотеки: Pandas, NumPy, Matplotlib, Seaborn, NLTK. API Qwen Cloud.
Загрузка документов	Поддержка форматов DOCX, PDF, TXT, CSV. Автоматическая конвертация в UTF-8. Извлечение ключевых метаданных.
Обработка информации	Предобработка текста через библиотеку NLTK. Формирование запросов к API Qwen Cloud. Статистическая обработка результатов через Pandas.

Категория	Характеристики
Функциональные возможности	Загрузка и анализ документов по мегапроектам. Формирование матриц интеграции <b>A</b> , влияния <b>P</b> и интенсивности <b>Q</b> . Расчет вектора рассогласования <b>D</b> и контрольной матрицы <b>C</b> . Построение прогнозных сценариев развития событий. Оценка эффективности действующих ВЦУИ.
Пользовательский интерфейс	Возможность выбора анализируемого этапа проекта. Настройка параметров анализа (пороговые значения интеграции, влияния). Экспорт результатов в Excel для дальнейшего анализа.
Процесс работы системы	Загрузка документов пользователем через веб-интерфейс. Предобработка текста и извлечение релевантной информации. Формирование запросов к нейросетевой модели согласно математической модели. Статистическая обработка полученных результатов. Визуализация и представление результатов.
Безопасность	Защита данных через шифрование AES-256. Двухфакторная аутентификация для доступа к системе. Ролевая модель управления доступом.
Производительность	Обработка одного документа объемом до 1 МБ за 1-2 минуты. Анализ пакета из 10 документов за 10–15 минут. Максимальный объем обрабатываемых данных за один сеанс – 100 МБ.
Масштабируемость	Возможность горизонтального масштабирования через Docker-контейнеры. Автоматическое масштабирование вычислительных ресурсов в зависимости от нагрузки.
Системные требования	Минимальные: процессор Intel Core i5, 8 ГБ RAM, 100 ГБ свободного места на диске. Рекомендуемые: процессор Intel Core i7, 16 ГБ RAM, 200 ГБ свободного места на диске, видеокарта NVIDIA RTX 2060.
Обучение системы	Использование предварительно обученной нейросетевой модели. Возможность дообучения на новых данных. Механизмы калибровки параметров для конкретных проектов.
Эргономичность	Интуитивно понятный интерфейс. Шаблоны запросов для типовых задач. Возможность сохранения настроек анализа.

## Приложение 2.

## Алгоритм обработки текстовых данных и генерации числовых оценок

Категория	Компоненты
Подготовка входных данных	Конвертация документов в UTF-8 формат. Извлечение метаданных: дата создания, авторы, источник. Стандартизация терминологии с помощью словаря эквивалентов.
Формирование промпта	Создание структурированного шаблона запроса на основе переменных математической модели. Включение контрольных точек для проверки логической последовательности выводов. Использование формализованного языка описания процессов управления проектами (на основе PMI PMBOK Guide).
Учет ограничений по количеству токенов	Разбиение документов на семантические блоки до 32768 токенов каждый. Последовательная загрузка блоков с сохранением контекста. Применение скользящего окна для перекрытия информации между блоками.
Параметры модели	Temperature: 0,1 (повышение детерминированности ответов). Top-p: 0,9 (обеспечение разнообразия при сохранении качества). Max output tokens: 8192 (полнота анализа контекста). Repetition penalty: 1,1 (снижение повторяемости).
Статистическая обработка результатов	Последовательное уточнение числовых оценок через среднее арифметическое и стандартное отклонение. Минимум 8 шагов загрузки документов для обеспечения сходимости средних значений.

Приложение 3.

Шаблоны промпт-инжиниринга

Шаблон промпта	Комментарий	Пример кода
Chain-of-Thought Prompting	Разбиение сложных задач на последовательность логически связанных шагов.	1. «Шаг 1. Выделите все пары стейкхолдеров с высокой интеграцией». 2. «Шаг 2. Проанализируйте характер их взаимодействия». 3. «Шаг 3. Оцените влияние на достижение целей проекта».
Few-Shot Learning	Предоставление нескольких примеров правильных ответов перед основным запросом.	1. «Пример 1. Для пары S1 и S4 на этапе 1 степень интеграции составляет 0,70». 2. «Пример 2. Для пары S5 и S6 на этапе 3 степень интеграции составляет 0,60». 3. «Теперь выполните аналогичный анализ для пары S2 и S3».
Calibration Prompting	Включение контрольных вопросов с известными ответами для корректировки вероятностей.	1. «Какова вероятность того, что S1 будет иметь высокую интеграцию со S4? (правильный ответ: 0,70)».
Decomposition Prompting	Разбиение сложных задач на подзадачи.	1. «Сначала определите интеграцию между всеми парами стейкхолдеров». 2. «Затем рассчитайте общую интенсивность изменений».
Output Parsing	Структурирование ответов в формате JSON для удобства дальнейшей обработки.	json 1. { 2. "integration_scores": { 3. "S1_S4": 0.70, 4. "S5_S6": 0.60 5. }, 6. "change_intensity": 0.85 7. }
Contextual Instructions	Включение контекста использования результата в запрос.	1. «Оценка нужна для построения матрицы интеграции для дальнейшего математического анализа».
Step-by-Step Feedback	Последовательная корректировка ответов моделью с обратной связью.	1. «Первая версия ответа – ...». 2. «Теперь улучшите ответ, учитывая ...».

Приложение 4.

Матрицы интеграции стейкхолдеров по этапам проекта

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Этап 1.	S1	1,00	0,85	0,90	0,70	0,10	0,20	0,20	0,30	0,60
	S2	0,85	0,70	0,38	0,60	0,18	0,30	0,33	0,40	0,70
	S3	0,90	0,38	1,00	0,50	0,10	0,11	0,10	0,20	0,39
	S4	0,70	0,60	0,50	0,80	0,30	0,40	0,30	0,50	0,60
	S5	0,10	0,18	0,10	0,30	0,60	0,55	0,40	0,30	0,22
	S6	0,20	0,30	0,11	0,40	0,55	0,80	0,60	0,40	0,36
	S7	0,20	0,33	0,10	0,30	0,40	0,60	0,70	0,51	0,30
	S8	0,30	0,40	0,20	0,50	0,30	0,40	0,51	0,60	0,40
	S9	0,60	0,70	0,39	0,60	0,22	0,36	0,30	0,40	0,70

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Этап 2.	S1	1,00	0,94	0,90	0,60	0,10	0,10	0,12	0,20	0,50
	S2	0,94	0,80	0,33	0,50	0,10	0,24	0,20	0,30	0,60
	S3	0,90	0,33	1,00	0,40	0,13	0,10	0,08	0,20	0,30
	S4	0,60	0,50	0,40	0,75	0,20	0,30	0,20	0,40	0,50
	S5	0,10	0,10	0,12	0,20	0,70	0,60	0,50	0,29	0,20
	S6	0,10	0,24	0,10	0,30	0,60	0,90	0,70	0,40	0,18
	S7	0,12	0,20	0,08	0,20	0,50	0,70	0,84	0,60	0,20
	S8	0,20	0,30	0,20	0,40	0,29	0,40	0,60	0,70	0,32
	S9	0,50	0,60	0,30	0,50	0,20	0,18	0,20	0,32	0,70

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Этап 3.	S1	0,98	0,73	0,90	0,40	0,10	0,05	0,05	0,10	0,30
	S2	0,73	0,60	0,20	0,30	0,08	0,10	0,10	0,20	0,40
	S3	0,90	0,20	1,00	0,30	0,10	0,03	0,00	0,13	0,22
	S4	0,40	0,30	0,30	0,60	0,20	0,20	0,10	0,30	0,40
	S5	0,10	0,08	0,10	0,20	0,80	0,70	0,60	0,29	0,20
	S6	0,05	0,10	0,03	0,20	0,70	1,00	0,80	0,40	0,20
	S7	0,05	0,10	0,00	0,10	0,60	0,80	0,90	0,50	0,18
	S8	0,10	0,20	0,13	0,30	0,29	0,40	0,50	0,70	0,30
	S9	0,30	0,40	0,22	0,40	0,20	0,20	0,18	0,30	0,60

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Этап 4.	S1	0,95	0,18	0,90	0,10	0,00	0,05	0,00	0,10	0,10
	S2	0,18	0,30	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,20
	S3	0,90	0,10	1,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,08
	S4	0,10	0,10	0,02	0,70	0,30	0,70	0,40	0,40	0,44
	S5	0,00	0,00	0,00	0,30	0,90	0,84	0,72	0,40	0,30
	S6	0,05	0,10	0,04	0,70	0,84	1,00	0,70	0,52	0,40
	S7	0,00	0,10	0,00	0,40	0,72	0,70	0,80	0,60	0,30
	S8	0,10	0,10	0,00	0,40	0,40	0,52	0,60	0,80	0,40
	S9	0,10	0,20	0,08	0,44	0,30	0,40	0,30	0,40	0,70

Приложение 5.

**Матрицы силы влияния стейкхолдеров на достижение целей по этапам проекта**

		G1.1	G1.2	G1.3	G1.4
Этап 1.	S1	1,00	0,80	0,88	0,80
	S2	0,70	0,40	0,50	0,90
	S3	0,90	0,72	0,80	0,50
	S4	0,60	0,30	0,40	0,70
	S5	-0,72	-0,90	-0,48	-0,40
	S6	-0,40	-0,30	-0,40	-0,63
	S7	-0,29	-0,22	-0,30	-0,30
	S8	0,20	0,10	0,23	0,30
	S9	0,50	0,28	0,40	0,60

		G2.1	G2.2	G2.3	G2.4
Этап 2.	S1	0,90	0,92	0,80	0,90
	S2	0,68	0,80	0,92	0,70
	S3	0,80	0,60	0,70	0,60
	S4	0,48	0,40	0,27	0,40
	S5	-0,80	-0,62	-0,50	-0,68
	S6	-0,63	-0,70	-0,80	-0,60
	S7	-0,50	-0,40	-0,30	-0,54
	S8	0,20	0,28	0,20	0,18
	S9	0,30	0,40	0,27	0,30

		G3.1	G3.2	G3.3	G3.4
Этап 3.	S1	0,98	0,59	0,40	0,50
	S2	0,60	0,40	0,26	0,40
	S3	0,82	0,53	0,30	0,20
	S4	0,54	0,20	0,40	0,60
	S5	-0,50	-0,72	-0,80	-0,54
	S6	-0,58	-0,83	-0,90	-0,40
	S7	-0,30	-0,37	-0,50	-0,32
	S8	0,10	0,08	0,20	0,30
	S9	0,18	0,20	0,30	0,40

		G4.1	G4.2	G4.3	G4.4
Этап 4.	S1	0,50	0,42	0,72	0,30
	S2	0,20	0,30	0,58	0,40
	S3	0,60	0,50	0,82	0,20
	S4	0,10	0,20	0,30	0,60
	S5	-0,20	-0,33	-0,40	0,11
	S6	-0,30	-0,40	-0,54	0,70
	S7	-0,10	-0,20	-0,30	0,42
	S8	0,08	0,20	0,18	0,50
	S9	0,20	0,30	0,40	0,63

Приложение 6.

**Матрицы интенсивности изменений проекта по этапам**

		G1.1	G1.2	G1.3	G1.4
Этап 1.	S1	2,98	2,00	2,43	2,73
	S2	2,13	1,33	1,71	2,10
	S3	2,46	1,73	2,06	2,07
	S4	1,99	1,16	1,60	1,96
	S5	-0,10	-0,39	-0,09	0,02
	S6	0,12	-0,25	0,05	0,20
	S7	0,22	-0,11	0,14	0,30
	S8	0,86	0,36	0,67	0,95
	S9	1,84	1,08	1,46	1,86

		G2.1	G2.2	G2.3	G2.4
Этап 2.	S1	2,53	2,53	2,47	2,33
	S2	1,80	1,92	1,77	1,72
	S3	1,95	1,85	1,78	1,74
	S4	1,34	1,39	1,24	1,23
	S5	-0,72	-0,57	-0,56	-0,68
	S6	-0,79	-0,63	-0,65	-0,76
	S7	-0,68	-0,49	-0,50	-0,67
	S8	0,19	0,33	0,27	0,13
	S9	1,24	1,36	1,25	1,17

		G3.1	G3.2	G3.3	G3.4
Этап 3.	S1	2,32	1,36	0,97	1,26
	S2	1,37	0,76	0,58	0,93
	S3	1,97	1,16	0,82	0,97
	S4	1,00	0,39	0,36	0,77
	S5	-0,59	-1,13	-1,28	-0,52
	S6	-0,85	-1,43	-1,59	-0,64
	S7	-0,79	-1,26	-1,41	-0,59
	S8	0,08	-0,34	-0,36	0,19
	S9	0,80	0,30	0,26	0,68

		G4.1	G4.2	G4.3	G4.4
Этап 4.	S1	1,07	0,95	1,59	0,75
	S2	0,23	0,26	0,43	0,54
	S3	1,08	0,92	1,55	0,59
	S4	-0,04	-0,03	-0,01	1,66
	S5	-0,38	-0,55	-0,75	1,56
	S6	-0,28	-0,38	-0,50	2,08
	S7	-0,27	-0,36	-0,50	1,67
	S8	-0,04	-0,03	-0,07	1,62
	S9	0,14	0,20	0,31	1,47

## Об авторе

### Михненко Павел Александрович

доктор экономических наук, доцент;

профессор, кафедра «Бизнес-информатика», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;

E-mail: pmihnenko@bmstu.ru

ORCID: 0000-0002-1766-8029

# Mathematical model and intelligent system for analyzing the intensity of megaproject changes: the role of temporary change management hubs

## Pavel A. Mikhnenko

E-mail: pmihnenko@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### Abstract

Megaprojects represent large-scale investment programs with complex organizational structures, uniting a multitude of stakeholders whose interactions lead to the redistribution of power and the creation of temporary management centers. In conditions of unstable and uncertain external environments, such stakeholder behavior can result in the failure to achieve the set goals of the megaproject. An important scientific task is the development of mathematical models and methods for managing changes in megaprojects caused by the integrative actions of stakeholders under complex external conditions. The present study is aimed at creating a mathematical model and developing an information system for neural network analysis of the intensity of changes in megaprojects. Megaproject management is described using a vector-matrix model of a dynamic system with feedback based on the results of changes. To identify recurring patterns of negative events, the event-oriented analysis method was used. This allows for justifying new approaches to management aimed at reducing uncertainty and enhancing the effectiveness of megaproject implementation. Based on the proposed tools, a retrospective neural network analysis of the intensity of changes in the “Nord Stream 2” megaproject was conducted. Within the study, key groups of stakeholders were identified whose interactions significantly impacted the project’s implementation: Group 1 – Gazprom PJSC, European companies and the governments of Russia and Germany supporting the project; Group 2 – the governments of transit countries, the USA, environmental organizations and Baltic region countries opposing the project or expressing concern about its consequences. It was demonstrated that the integration of separate stakeholder groups contributes to the formation of temporary

management centers with varying interests, leading to an increase in both positive and negative changes within the project. The outcome of the work was the development of an information system for analyzing the intensity of changes in megaprojects in the form of a prototype, which includes: a mathematical model for managing changes in megaprojects; a neural network analysis methodology based on the use of a large language model for processing textual information and generating quantitative assessments; as well as a software interface for uploading documents, automated data processing, and visualization of results. The primary neural network used was the large language model Qwen 2.5-Plus, which, while not specifically adapted for this task, had its parameters calibrated for analyzing the intensity of changes in megaprojects. The system prototype provides users with the ability to analyze stakeholder interactions, assess the intensity of changes and forecast potential risks based on historical data. A promising direction for further research involves applying the model we developed and neural network analysis methodology for comparative studies of various types of megaprojects.

**Keywords:** megaproject, “Nord Stream 2”, stakeholders, integration activity, uncertainty, intensity of changes, temporary change management center, mathematical model, large language model, neural network analysis, information system

**Citation:** Mikhnenko P.A. (2025) Mathematical model and intelligent system for analyzing the intensity of megaproject changes: the role of temporary change management hubs. *Business Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 54–76. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.54.76

## References

1. Abdikeev N.M., Bogachev Yu.S., Bekulova S.R. (2019) Institutional mechanisms for ensuring a scientific and technological breakthrough in the Russian economy. *Management Sciences*, no. 9(1), pp. 6–19 (in Russian). <https://doi.org/10.26794/2304-022X-2019-9-1-6-19>
2. Mitrofanova I.V., Zhukov A.N., Batmanova V.V., Mitrofanova I.A. (2014) Megaprojects of territorial development: The experience of the United States of America and the Russian Federation. *National interests: priorities and security*, no. 31(268), pp. 28–40 (in Russian).
3. Daniel E., Daniel P.A. (2019) Megaprojects as complex adaptive systems: The Hinkley point C case. *International Journal of Project Management*, vol. 37, no. 8, pp. 1017–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2019.05.001>
4. Gil N.A. (2023) Cracking the megaproject puzzle: A stakeholder perspective? *International Journal of Project Management*, vol. 41, no. 3, article 102455. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102455>
5. Floricel S., Brunet M. (2023) Grandstanding? The elusive process of shaping megaproject symbolism. *International Journal of Project Management*, vol. 41, no. 5, article 102498. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102498>
6. Flyvbjerg B. (2014) What Pou should know about megaprojects and why: An overview. *Project Management Journal*, vol. 45, no. 2, pp. 6–19. <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>
7. Baerenbold R. (2023) Reducing risks in megaprojects: The potential of reference class forecasting. *Project Leadership and Society*, vol. 4, article 100103. <https://doi.org/10.1016/j.plas.2023.100103>
8. Favari E., Cantoni F. (eds.) (2020) *Megaproject management: A multidisciplinary approach to embrace complexity and sustainability*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39354-0>
9. Gusev A.B., Yurevich M.A. (2022) The state management system of megaprojects as a model for restoring sovereignty. *Voprosy teoreticheskoy ekonomiki*, no. 3, pp. 62–76 (in Russian).
10. Balatsky E.V., Ekimova N.A. (2021) Phenomenon of megaprojects in multi-contour economy model. *Journal of Economic Regulation*, vol. 12, no. 4, pp. 25–39 (in Russian). <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2021.12.4.025-039>
11. Bourne M., Bosch-Rekveltdt M., Pesämaa O. (2023) Moving goals and governance in megaprojects. *International Journal of Project Management*, vol. 41, article 102486. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102486>
12. Jiang K., Le P., Zheng A., Zhang A., Ouyang L. (2023) Toward a systematic understanding of megaproject improvisation. *International Journal of Project Management*, vol. 41, article 102529. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102529>
13. Machiels T., Compernelle T., Coppens T. (2023) Stakeholder perceptions of uncertainty matter in megaprojects: The Flemish A102 infrastructure project. *International Journal of Project Management*, vol. 41, article 102437. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102437>

14. Martinsuo M., Ahola T. (2010) Supplier integration in complex delivery projects: Comparison between different buyer-supplier relationships. *International Journal of Project Management*, vol. 28, no. 2, pp. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.09.004>
15. Sun J., Zhang P. (2011) Owner organization design for mega industrial construction projects. *International Journal of Project Management*, vol. 29, no. 7, pp. 828–833. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.04.005>
16. Zani C.M., Denicol J., Broyd T. (2024) Organization design in megaprojects: A systematic literature review and research agenda. *International Journal of Project Management*, vol. 42, no. 6, article 102634. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2024.102634>
17. Burton R.M., Obel B. (2018) The science of organizational design: fit between structure and coordination. *Journal of Organization Design*, vol. 7, article 5. <https://doi.org/10.1186/s41469-018-0029-2>
18. Bakker R.M. (2010) Taking stock of temporary organizational forms: A systematic review and research agenda. *International Journal of Management Reviews*, vol. 12, no. 4, pp. 466–486. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2010.00281.x>
19. Denicol J., Davies A., Pryke S. (2021) The organizational architecture of megaprojects. *International Journal of Project Management*, vol. 39, no.4, pp. 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2021.02.002>
20. Satheesh S.A., Verweij S., van Meerkerk I., Busscher T., Arts J. (2023) The impact of boundary spanning by public managers on collaboration and infrastructure project performance. *Public performance & management review*, vol. 46, no. 2, pp. 418–444. <https://doi.org/10.1080/15309576.2022.2137212>
21. Denicol J., Davies A. (2022) The Megaproject-based firm: Building programme management capability to deliver megaprojects. *International Journal of Project Management*, vol. 40, no. 5, pp. 505–516. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2022.06.002>
22. Offenbeek M.A.G., Vos J.F.J. (2016) An integrative framework for managing project issues across stakeholder groups. *International Journal of Project Management*, vol. 34, no.1, pp. 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.09.006>
23. Morkan B., Bertels H.M.J., Sheth A., Holahan P.J. (2023) Building megaproject resilience with stakeholders: The roles of citizenship behavior and critical transition mechanisms. *International Journal of Project Management*, vol. 41, no. 5, article 102485. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2023.102485>
24. Jayasuriya S., Zhang G., Pang R. J. (2024) Towards successful economic infrastructure partnership project delivery through effective stakeholder management. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 26, article 101173. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101173>
25. Mikhnenko P. (2009) Optimization of economic organization adaptation to environment changes. *Control sciences*, no. 4, pp. 32–38 (in Russian).

### About the author

#### **Pavel A. Mikhnenko**

Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor;

Professor, Department of Business Informatics, Bauman Moscow State Technical University, 5, building 1, 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia;

E-mail: [pmihnenko@bmstu.ru](mailto:pmihnenko@bmstu.ru)

ORCID: 0000-0002-1766-8029

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.77.88

# Параллельная реализация симплекс-метода в матричной форме средствами библиотеки PyTorch для задач экономики и менеджмента

Ю.С. Эзрох <sup>a</sup> 

E-mail: ezrokh@corp.nstu.ru

А.В. Снытников <sup>a,b</sup> 

E-mail: aleksej.snytnikov@klgtu.ru

Е.Ю. Скоробогатых <sup>b</sup> 

E-mail: elena.skorobogatykh@klgtu.ru

<sup>a</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>b</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

## Аннотация

Симплекс-метод имеет широкое применение в задачах экономического планирования и прогнозирования. Однако, этот метод используется в реальной экономической деятельности для поиска решения масштабных задач, скорость выполнения процедур которых не является критичным фактором. Это в существенной степени ограничивает прикладное значение симплекс-метода в экономической сфере, поскольку в настоящее время сформировалась определенная тенденция перехода к более подробным экономическим моделям, что делает актуальной задачу ускорения расчетов на основе симплекс-метода. В этих условиях важнейшим средством ускорения расчетов становятся графические ускорители вычислений GPU (Graphical Processor Unit). Авторами предлагается реализация симплекс-метода в матричной форме для вычислений на графических процессорах средствами библиотеки PyTorch, которая позволяет перейти к использованию вычислительных мощностей графических процессоров

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

простым и надежным способом. Задача линейного программирования с 900 ограничениями решается на графическом ускорителе в 6–9 раз быстрее по сравнению с решением на обычном процессоре. В работе выделены группы прикладных экономических задач, для которых предложенные алгоритмы и методы могут быть актуальны.

**Ключевые слова:** модифицированный симплекс-метод, ускорение вычислений, графические процессоры, задачи линейного программирования в экономике

**Цитирование:** Эзрох Ю.С., Снытников А.В., Скоробогатых Е.Ю. Параллельная реализация симплекс-метода в матричной форме средствами библиотеки PyTorch для задач экономики и менеджмента // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 2. С. 77–88. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.77.88

### Введение

Симплекс-метод [1] широко используется в задачах экономического планирования и прогнозирования [2, 3]. В широком смысле задача линейного программирования [4] состоит в том, что необходимо максимизировать или минимизировать некоторый линейный функционал на многомерном пространстве при заданных линейных ограничениях [5–7].

Роль линейного программирования, в частности, симплекс-метода, в экономическом анализе и планировании описана в [8]. Там говорится, что линейное программирование рассматривалось как инструмент реализации неоклассических экономических принципов как раз в то время, когда сама концепция рыночной экономики подверглась атаке с нескольких направлений. Линейное программирование стало широко использоваться в народнохозяйственном планировании [9–11], особенно для развивающихся стран, и для изучения отдельных отраслей, особенно энергетики. В статье [12] описывается опыт применения линейного программирования к нефтеперерабатывающей промышленности США. Использование линейного программирования в сочетании с более тщательным выбором источников информации обеспечивает большую предсказательную способность по сравнению с использованием прогнозов на основании временных рядов. Также [13] подчеркивает необходимость полного понимания специфики производственных процессов, в противном случае методы математической экономики [14], в частности, линейное программирование дают лишь очень приблизительные результаты.

Работы [15, 16] характеризуют использование симплекс-метода следующим образом: эту процедуру можно интерпретировать как поиск рыночных цен, уравнивающих спрос на факторы производства с их предложением.

В то же время практически отсутствуют работы, в которых бы апробировалось применение симплекс-метода для решения большого числа однотипных задач с множеством условий в короткое время для индивидуальных пользователей. Иными словами, симплекс-метод используется в реальной экономической деятельности для поиска решения масштабных задач, скорость выполнения процедур которого не является критичным фактором. Это в существенной степени ограничивает прикладное значение симплекс-метода в экономической сфере.

Таким образом, на основании того, что симплекс-метод активно используется и существует определенная тенденция перехода к более подробным моделям, можно сделать вывод, что существует необходимость ускорения расчетов на его основе, причем, в первую очередь, речь идет о расчетах, проводимых на бытовых/офисных компьютерах, а не на суперЭВМ [17–19]. В таком случае важнейшим средством ускорения расчетов становятся графические ускорители вычислений (или графические процессоры, англ. Graphical Processor Unit, GPU) [20, 21].

Графические процессоры представляют собой набор из очень большого количества (до 10 тыс.) упрощенных процессорных ядер с общей памятью, на которых может быть запущено несколько десятков тысяч параллельных процессов. Это означает, что графические ускорители очень хорошо подходят

для решения задач линейной алгебры (типа умножения матриц). Время вычисления на графических процессорах обычно рассматривается в сравнении с временем вычислений на основном процессоре компьютера (англ. Central Processor Unit, CPU).

### 1. Обзор параллельных реализаций симплекс-метода

В статье [22] представлено распараллеливание симплекс-метода в табличном варианте для систем с общей памятью с целью решения крупномасштабных задач линейного программирования с плотной матрицей. Авторами описана общая схема метода и объяснены стратегии, принятые для распараллеливания каждого шага стандартного симплексного алгоритма. Проанализировано ускорение и параллельная эффективность по сравнению со стандартным симплекс-методом при использовании системы с общей памятью и 64 вычислительными ядрами. Эксперименты были выполнены для нескольких различных задач, до 8192 переменных и ограничений. Максимальное достигнутое ускорение – порядка 19.

Работа [23] рассматривает распараллеливание симплекс-метода на основе технологии OpenMP. Такой подход используется для того, чтобы улучшить ускорение и эффективность. Полученные результаты работы параллельного алгоритма сравниваются с обычным симплекс-методом. Также в этой работе использовалась такая особенность современных процессоров, как многопоточность. Предложенный алгоритм распараллеливания легко масштабируется на другое количество процессорных ядер. В общем случае на примере решения задачи о распределении вагонов между грузовыми терминалами железнодорожной станции проведен ряд вычислительных экспериментов. Сообщается об ускорении в 7 раз для 8 потоков OpenMP при размерности данных более  $10^2$ .

В статье [24] рассматриваются предыдущие попытки распараллелить симплекс-метод в контексте улучшения производительности последовательных реализаций симплекс-метода и характера практических задач линейного программирования (ЛП). Для основной задачи решения общих больших разреженных задач ЛП автором статьи не было найдено распараллеливания симплекс-метода, обеспечивающего значительное улучшение производительности по сравнению с хорошей последовательной реализацией. Однако был достигнут определенный

успех в разработке параллельных решателей для плотных или обладающих особыми структурными свойствами задач ЛП. В результате проведенного обзора в данной работе определены направления будущей работы, направленной на разработку параллельных реализаций симплекс-метода, имеющих практическую ценность. Эти направления связаны с использованием параллельных методов факторизации и параллельных методов обращения разреженных матриц.

В работе [25] отмечено, что исследования, посвященные реализации методов математического программирования на GPU все еще находятся в зачаточном состоянии. Один из вариантов заключается в том, чтобы изменить существующие алгоритмы таким образом, чтобы получить значительный прирост производительности за счет выполнения на графическом процессоре. В статье [25] решается именно эта проблема, через представление эффективной реализации для симплекс-метода, адаптированного для GPU. В статье описывается, как выполнять шаги адаптированного симплексного метода, чтобы в полной мере использовать возможности графического процессора. Проведенные эксперименты демонстрируют значительное ускорение по сравнению с последовательной реализацией, что подчеркивает огромный потенциал GPU.

Приведенный обзор показывает, во-первых, актуальность работы по параллельной реализации симплекс-метода, и во-вторых, что эта работа должна быть в основном ориентирована на вычислительные системы с общей памятью, в частности, на GPU, что подтверждает правильность постановки задачи для данной статьи.

### 2. Описание симплекс-метода в матричной форме

В связи с необходимостью провести подробный анализ производительности алгоритма, а также для того, чтобы подчеркнуть отличие от более распространенного симплекс-метода в форме таблиц, приведем описание симплекс-метода в матричной форме (или «модифицированный симплекс-метод», англ. revised simplex method), следуя книге [26].

Рассмотрим задачу линейного программирования в следующем виде: требуется минимизировать  $cx$  при условии  $Ax = b$ ,  $x \geq 0$ , где  $A$  – матрица размера  $m \times n$ , имеющая ранг  $m$ . Алгоритм решения задачи представлен на *рисунке 1*.

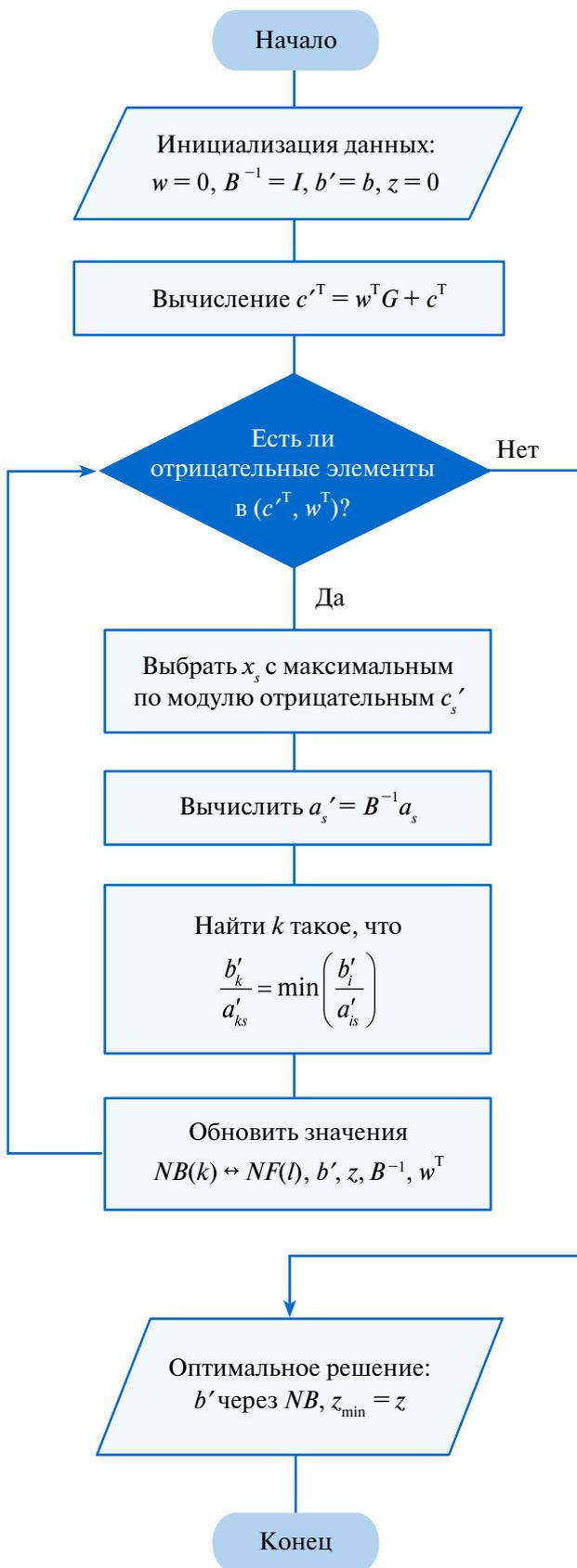


Рис. 1. Алгоритм модифицированного симплекс-метода.

Далее приведем пошаговое описание алгоритма.

### 2.1. Шаг инициализации

Выбрать начальное основное допустимое решение с базисом  $B$ .

### 2.2. Основная часть алгоритма

1. Решить систему линейных алгебраических уравнений  $Bx_B = b$ .
2. Решить систему линейных алгебраических уравнений  $wB = c_b$  с единственным решением  $w = c_b B^{-1}$ . Вектор  $w$  принято называть симплекс-множителем из-за того, что его компоненты используются как множители для строк матрицы  $A$  при приведении ее в каноническую форму. Далее необходимо вычислить  $z_j - c_j = w a_j - c_j$  для всех небазисных переменных. Пусть  $z_j - c_j = \max_{j \in J} \{z_j - c_j\}$ , где  $J$  – текущий набор индексов, связанных с небазисными переменными. Если  $z_k - c_k \leq 0$ , то текущее решение представляет собой оптимальное решение. В противном случае, выполняется шаг 3, при этом  $x_k$ .
3. Решить систему  $B y_k = a_k$ . Если  $y_k \leq 0$ , тогда расчет прекращается, и делается вывод, что оптимальное решение неограниченно и находится на прямой

$$\left\{ \begin{bmatrix} \bar{b} \\ 0 \end{bmatrix} + x_k \begin{bmatrix} -y_k \\ e_k \end{bmatrix} : x_k \geq 0 \right\},$$

где  $e_k$  – вектор длины  $(n - m)$ , состоящий из нулей, за исключением компоненты с номером  $k$ , которая равна 1.

Если  $y_k \geq 0$ , то далее выполняется шаг 4.

4. Пусть  $x_k$  входит в базис. Тогда  $r$  – индекс блокирующей переменной  $x_{B_r}$ , такой что базис остается неизменным в результате следующей проверки на минимальное отношение

$$y_{r,k} = \min_{1 \leq i \leq m} \left\{ \frac{\bar{b}_r}{y_{i,k}} : y_{i,k} > 0 \right\}.$$

Далее необходимо обновить базис  $B$ , где  $a_k$  заменяет  $a_{B_r}$ , обновить набор индексов  $J$  и повторить шаг 1.

### 2.3. Производительность реализации симплекс-метода в матричной форме

Время работы симплекс-метода в матричной форме было измерено на нескольких модельных задачах на компьютере с процессором Intel Core i7 950, 3.07 GHz (*таблица 1*). Модельные задачи были сгенерированы с помощью онлайн-генератора задач линейного программирования [27].

Таблица 1.

Время работы симплекс-метода в матричной форме

Количество ограничений	Размер матрицы $A$	Время, мс
10	10 × 20	9,3
10	10 × 910	27,1
100	100 × 600	36,7
900	900 × 1800	222,3

### 3. Программная реализация симплекс-метода в матричной форме

Современные средства языка программирования Python, а именно библиотека NumPy, дают возможность исключительно удобной реализации вычислительных алгоритмов, основанных на операциях с матрицами. Вследствие этого реализация симплекс-метода была выполнена в соответствии с процедурой, описанной в разделе 2.

Одна из задач данной работы в том, чтобы показать, что использовать мощности высокопроизводительных вычислений для решения прикладных задач можно с помощью очень простых в использовании инструментов. В связи с этим для реализации симплекс-метода на GPU была ис-

пользована библиотека PyTorch, предназначенная для работы с нейронными сетями. Библиотека PyTorch обладает двумя важными с точки зрения решаемой задачи достоинствами: большой набор инструментов для матричных вычислений и возможность перенести вычисления на GPU без изменения программы, просто добавкой одной инструкции, имеющей смысл «передать матрицу на GPU». Все дальнейшие вычисления с указанной матрицей будут проводиться на GPU. Как видно из *таблицы 2*, при переносе расчета на GPU с использованием библиотеки PyTorch время счета заметно уменьшается.

Не приводя листинги кода, тем не менее можно сказать, что при использовании альтернативных вариантов реализации симплекс-метода, основным из которых является технология CUDA, необходимо перед вычислением, например, матричного произведения выполнить несколько подготовительных операций, а именно переместить матрицы из памяти компьютера в память GPU и преобразовать в формат, оптимальный с точки зрения вычислений на GPU. Затем выполняется, собственно, реализация произведения матриц на основе асинхронных вычислений с помощью максимально возможного количества параллельных процессов.

Таким образом, видно, что перенос вычислительных алгоритмов на GPU с помощью библиотеки PyTorch оказываются значительно проще, чем при использовании специализированных инструментов программирования, таких как CUDA, OpenACC, cuBLAS и пр.

Производительность симплекс-метода, реализованного на GPU, была измерена на графическом ускорителе Nvidia TITAN X, а также на Nvidia Volta (вычислительный кластер НИВЦ НГУ), результаты измерений представлены в *таблице 2*.

Таблица 2.

Производительность симплекс-метода, реализованного на GPU

Количество ограничений	Размер матрицы $A$	Время на Titan, мс	Время на Volta, мс	Время на CPU, мс
10	10 × 20	1,9	1,3	9,3
10	10 × 910	4,4	4,4	27,1
100	100 × 600	5,2	5,2	36,7
900	900 × 1800	81,9	23,7	222,3

Меньшее время счета для Nvidia Volta достигается за счет, так называемых, «тензорных ядер» (англ. tensor cores), которые дополнительно ускоряют операции типа матричного умножения.

Также производительность программы была проанализирована на графическом ускорителе Nvidia A100 Ampere, установленном на вычислительном комплексе «Эйлер» КГТУ. На *рисунке 2* показана зависимость времени работы процедуры обращения матрицы, как математически наиболее трудоемкой операции, от параметра  $N$ , который с точки зрения симплекс-метода представляет собой количество переменных. Здесь важно обратить внимание на то, что обращение матрицы реализовано на CUDA средствами библиотеки PyTorch, и приведенный график не означает, что получена линейная зависимость времени работы обращения матрицы от количества переменных. Для прояснения этого тезиса рассмотрим количество потоков CUDA (CUDA threads). В силу того, что алгоритм обращения матрицы не реализуется вручную, на CUDA выбор количества потоков выполняется автоматически, тем не менее профилировщик дает возможность увидеть, сколько потоков используется, результат показан на *рисунке 3*.

Кроме того, интересно выглядит зависимость времени обращения матрицы от количества ограничений симплекс-метода  $M$  (*рис. 4*).

#### 4. Направления прикладного экономического применения программной реализации симплекс-метода в матричной форме

Вышеописанные алгоритмы и подходы могут быть использованы при решении трех основных групп прикладных экономических задач, в том числе в области маркетинга, менеджмента (в рамках управления клиентским опытом, а также реализации ассортиментной и продуктовой политики), а также финансов.

*Первая группа* – коммерческие задачи в области маркетингового продвижения товаров/услуг, требующие мгновенного решения в виде онлайн отклика для получения положительного сверхэффекта спонтанных покупок. Примером этого может являться приложение продуктовых гипермаркетов, которое в режиме пресейл формирует итоговую потребительскую корзину текущего заказа. Учитывая возрастающий уровень детализа-

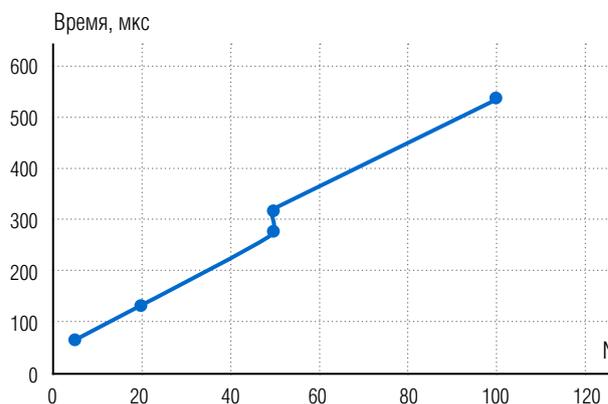


Рис. 2. Зависимость времени обращения матрицы на графическом ускорителе Nvidia A100 от количества переменных симплекс-метода.

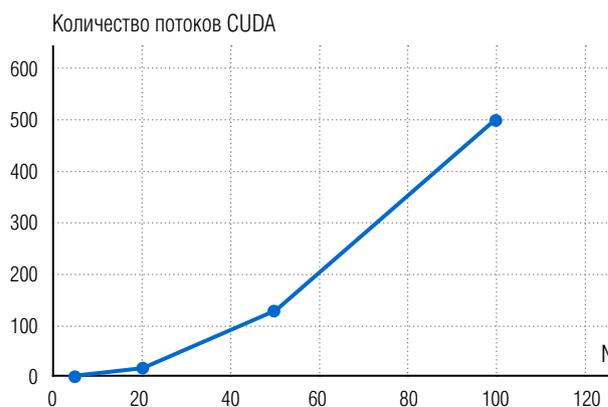


Рис. 3. Количество потоков CUDA, используемых при выполнении обращения матрицы при реализации симплекс-метода, на графическом ускорителе Nvidia A100.

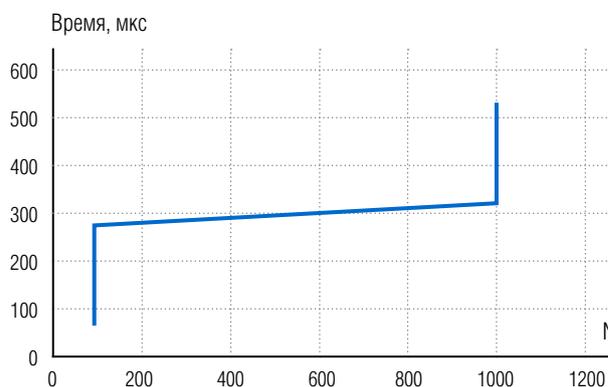


Рис. 4. Зависимость времени обращения матрицы на графическом ускорителе Nvidia A100, от количества ограничений симплекс-метода.

ции информации о клиенте (его личные данные, а также история покупок), число параметров, выступающих ограничениями в рамках симплекс-метода, становится достаточно большим, что оправдывает его применение. В такой ситуации клиент не готов ожидать время, требуемое для вычисления CPU (с учетом очереди клиентов), а также на передачу информации. Учитывая скорость современной жизни, клиент ориентирован на получение исключительно мгновенного результата, достигаемого с применением графических ускорителей, который сопровождается соответствующим объяснением-обоснованием.

*Вторая группа* экономических задач — интеллектуализация работы высокопроизводительных чат-ботов, использующих fuzzy logic, то есть генерирующих нестандартные ответы на заранее незапрограммированные вопросы. Это позволит значительно увеличить способность выполнения функции личного помощника, в том числе: а) расширить горизонт планирования расписания, которое сможет учитывать ограничения членов семьи, рабочих календарных планов, климатическую сезонность и т.д.; б) готовить обоснованные рекомендации в области здорового образа жизни, в том числе состав и рецептуру комбинированных продуктов, учитывающих геронтологические, антропометрические, личностные данные, вкусовые предпочтения и т.д. Очевидно, что увеличивающийся масштаб применения ботов-помощников позволит осуществлять более таргетированное взаимодействие с потребителями, а также использовать селлерам алгоритмы рекомендательных систем (задачи на стыке с описанными выше в первой группе). Так, например, на основании характеристик продуктов питания (от простейшего состава белков, жиров и углеводов, до характеристик взаимного дополнения отдельных продуктов или невозможности их совместного употребления) может решаться проблема формирования наиболее оптимального портфеля заказов в гипермаркетах, осуществляющих доставку своей продукции клиентам. В такой ситуации матрица линейных ограничений может существенно выходить за рамки, которые определены в статье, что подчеркивает важность практического применения. Вместе с тем, стоит подчеркнуть, что клиентопоток крупных субъектов электронной коммерции имеет тенденцию к резкому росту, тренд

на который может сохраниться как минимум в среднесрочной перспективе. При этом даже снижение темпов прироста интернет-бизнеса через 3–5 лет приведет, скорее всего, не к спаду, а к выходу соответствующих экономических показателей на плато с сохранением значительного объема удаленного взаимодействия компаний с клиентами в долгосрочной перспективе.

*Третья группа* объединяет финансово-экономические задачи, где скорость принятия решения является одним из ключевых факторов успешной алгоритмической торговли на биржевом и внебиржевом рынках. Стоит отметить, что данная группа задач является, в настоящее время, с одной стороны, одной из наиболее крупных по количеству участников ввиду, так как подавляющее большинство трейдеров при организации своей деятельности ориентированы на использование различных математических моделей. С другой стороны, конкуренция имеющихся способов алгоритмизации и высокая «цена ошибки» трейдинга в принципе, который осуществляется зачастую на средства клиентов или с использованием схем маржинальной торговли, затрудняют тестирование гипотез, неизбежным образом происходящее в рамках применения новых методов машинного обучения.

Стоит подчеркнуть, что указанные выше группы не исчерпывают задачи, где может быть эффективно применен симплекс-метод в матричной форме на GPU. К ним относятся традиционные экономические вопросы в области оптимизации с учетом ограниченности ресурсов, а также иные, например, творческие задачи (Basadur Simplex).

### Заключение

Проведенное исследование показало, что перенос реализации симплекс-метода в матричной форме на GPU с помощью библиотеки PyTorch делает решение задачи значительно проще, чем при использовании специализированных инструментов программирования, таких как CUDA, OpenACC, cuBLAS и пр. Возникает вопрос о том, насколько хорошие результаты дает этот более простой метод. Для проведенных тестовых расчетов, при переносе расчета на GPU с использованием библиотеки PyTorch время счета уменьшается в 3–5 раз в зависимости от размера задачи.

С другой стороны, важно получить возможность ускорить расчеты по симплекс-методу для сравнительно небольших задач и для обычных рабочих станций, используемых в реальных экономических расчетах, а не для сверхбольших постановок задач, которые могут решаться только на суперЭВМ, что соответствует реальной практике, поскольку даже расчеты, проводимые в рамках экономической науки, не дают примеров очень крупных задач для симплекс-метода. В работе представлены три основные группы прикладных экономических задач, которые могут быть эффек-

тивно решены с использованием обоснованного в статье инструментария.

Также необходимо отметить, что технология CUDA позволяет почти во всех случаях получить наибольшую эффективность реализации на GPU по сравнению с PyTorch, тем не менее, CUDA настолько сложна, что ее использование для решения какой-то реальной задачи представляет обычно отдельный большой вопрос. В данной работе используется менее эффективный, но значительно более простой инструмент. ■

### Литература

1. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Ленинград: ЛГУ, 1939.
2. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. Создание суперкомпьютерной имитации общества с активными агентами разных типов и ее апробация // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92. № 5. С. 458–466.
3. Kolev M., Georgiadou S. On simulation and modeling in economics // Asian-European Journal of Mathematics. 2022. Vol. 15. No. 10. Article 2250239. <https://doi.org/10.1142/s1793557122502394>
4. Hybrid variable neighborhood search for automated warehouse scheduling / I. Davydov [et al.] // Optimization Letters. 2023. Vol. 17. No. 9. P. 2185–2199. <https://doi.org/10.1007/s11590-022-01921-6>
5. Чистякова Т.Б., Шашихина О.Е. Интеллектуальный программный комплекс моделирования процесса планирования многоассортиментных промышленных производств // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 5(101). С. 41–50. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-5-41-50>
6. Бекларян Л.А., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Динамические и агентные модели интеллектуальных транспортных систем // Экономика и математические методы. 2024. Т. 60. № 2. С. 105–122. <https://doi.org/10.31857/S0424738824020091>
7. Mochurad L., Boyko N., Sheketa V. Parallelization of the method of simulated annealing when solving multicriteria optimization problems // Proceedings of the CEUR Workshop. Lviv, 2020. P. 12–24.
8. Arrow K.J. George Dantzig in the development of economic analysis // Discrete Optimization. 2008. Vol. 5. No. 2. P. 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2006.11.007>
9. Ratushnyi A., Kochetov Y. A column generation based heuristic for a temporal bin packing problem // Proceedings of the 20th International Conference Mathematical Optimization Theory and Operations Research (MOTOR 2021) (eds. P. Pardalos, M. Khachay, A. Kazakov), Irkutsk, Russia, July 5–10, 2021. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12755. P. 96–110. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77876-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77876-7_7)
10. Кочетов Ю.А., Шамрай Н.Б. Оптимизация размещения и передислокации бригад скорой медицинской помощи // Дискретный анализ и исследование операций. 2021. Т. 28. № 2(148). С. 5–34. <https://doi.org/10.33048/daio.2021.28.702>
11. Ковешников В.А., Мехтиев А.Я. Исследование накопительно-сортировочного метода решения задач параметрической оптимизации // Проблемы управления. 2020. № 2. С. 28–35. <https://doi.org/10.25728/ru.2020.2.3>
12. Manne A.S. A linear programming model of the U.S. petroleum refining industry // Econometrica. 1958. No. 26. P. 67–196.
13. Chenery H.B. Engineering production functions // Quarterly Journal of Economics. 1949. No. 63. P. 507–531.
14. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
15. Scarf H.E. Mathematical programming and economic theory // Operations Research. 1990. Vol. 38. No. 3. P. 377–385. <https://doi.org/10.1287/opre.38.3.377>
16. Апалькова Т.Г., Косоруков О.А., Мищенко А.В., Цурков В.И. Математические модели управления производственно-финансовой деятельностью предприятия // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2024. № 2. С. 107–129. <https://doi.org/10.31857/S0002338824020109>

17. Gergel V., Grishagin V., Liniov A., Shumikhin S. Parallel computations in integrated environment of engineering modeling and global optimization // Proceedings of the 16th International Conference (PaCT 2021), Kaliningrad, Russia, September 13–18, 2021 (ed. V. Malyshkin). Lecture Notes in Computer Science. 2021. Vol. 12942. P. 413–419. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86359-3\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86359-3_31)
18. Gergel V., Kozinov E. Parallel computations for solving multicriteria mixed-integer optimization problems // Communications in Computer and Information Science. 2021. Vol. 1437. P. 92–107. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81691-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81691-9_7)
19. Shichkina Y., Kupriyanov M., Awadh AM.M.H. Application of methods for optimizing parallel algorithms for solving problems of distributed computing systems // Proceedings of the International Conference on Cyber-Physical Systems and Control (CPS&C'2019), St. Petersburg, Russia, June 10–12, 2019 (eds. D. Arseniev, L. Overmeyer, H. Kälviäinen, B. Katalinić). Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 95. P. 212–224. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7_21)
20. Моделирование миграционных и демографических процессов с использованием FLAME GPU / В.Л. Макаров и [др.] // Бизнес-информатика. 2022. Т. 16. № 1. С. 7–21. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.1.7.21>
21. Beklaryan A.L., Akopov A.S., Beklaryan L.A. Implementation of the Deffuant model within the FLAME GPU framework // Advances in Systems Science and Applications. 2021. Vol. 21. No. 4. P. 87–99. <https://doi.org/10.25728/assa.2021.21.4.1161>
22. Coutinho D.A.M., Lins e Silva F.O., Aloise D., Xavier-de-Souza S. A scalable shared-memory parallel simplex for large-scale linear programming // arXiv:1804.04737v2. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.04737>
23. Mochurad L. Parallelization of the Simplex method based on the OpenMP technology // Proceedings of the 4th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2020), Lviv, Ukraine, April 23–24, 2020. P. 952–963.
24. Hall J.A.J. Towards a practical parallelization of the Simplex method // Computational Management Science. 2010. Vol. 7. P. 139–170. <https://doi.org/10.1007/s10287-008-0080-5>
25. Bieling J. An efficient GPU implementation of the revised simplex method // Proceedings of the IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing, Workshops and PhD Forum (IPDPSW), Atlanta, GA, USA, 2010. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2010.5470831>
26. Bazaraa M.S., Jarvis J.J., Sherali H.D. Linear programming and network flows. John Wiley Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
27. LP random problem generator // Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2025. [Электронный ресурс]: <https://web.tecnico.ulisboa.pt/~mcasquilho/compute/or/Fx-LP-generator.php> (дата обращения 20.04.2025).

## Об авторах

### Эзрох Юрий Семенович

доктор экономических наук, доцент;

заведующий кафедрой, кафедра экономической информатики, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, улица Карла Маркса, д. 6;

E-mail: ezrokh@corp.nstu.ru

ORCID: 0000-0002-8367-1840

### Снытников Алексей Владимирович

доктор технических наук;

профессор, кафедра прикладной информатики, Калининградский государственный технический университет, Россия, 236022, г. Калининград, проспект Советский, д. 1;

E-mail: aleksej.snytnikov@klgtu.ru

ORCID: 0000-0003-4111-308X

### Скоробогатых Елена Юрьевна

кандидат педагогических наук, доцент;

доцент, кафедра прикладной информатики и информационных технологий, Калининградский государственный технический университет, Россия, 236022, г. Калининград, проспект Советский, д. 1;

E-mail: elena.skorobogatykh@klgtu.ru

ORCID: 0000-0001-6050-4831

# Parallel implementation of the simplex method in matrix form using the PyTorch library for economics and management problems

**Yuriy S. Ezrokh**<sup>a</sup>

E-mail: ezrokh@corp.nstu.ru

**Alexey V. Snytnikov**<sup>a,b</sup>

E-mail: aleksej.snytnikov@klgtu.ru

**Elena Yu. Skorobogatykh**<sup>b</sup>

E-mail: elena.skorobogatykh@klgtu.ru

<sup>a</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>b</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

## Abstract

The simplex method is widely used in economic planning and forecasting tasks. However, this method is used in real economic activity to find solutions to large-scale tasks, the speed of which is not a critical factor. This significantly limits the applied value of the simplex method in the economic sphere, since currently there is a certain tendency to move to more detailed economic models, which makes it urgent to accelerate calculations based on the simplex method. In these conditions, GPU (Graphical Processor Unit) computing accelerators become the most important means of accelerating calculations. The authors propose the implementation of the simplex method in matrix form for computing on GPUs using the PyTorch library. This allows you to switch to using the computing power of graphics processors in a simple and reliable way. A linear programming problem with 900 constraints is solved on a graphics accelerator 6–9 times faster than the solution on a conventional processor. This paper identifies groups of applied economic problems for which the proposed algorithms and methods can be relevant.

**Keywords:** modified simplex method, acceleration of calculations, graphics processors, linear programming problems in economics

**Citation:** Ezrokh Y.S., Snytnikov A.V., Skorobogatykh E.Yu. (2025) Parallel implementation of the simplex method in matrix form using the PyTorch library for economics and management problems. *Business Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 77–88. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.77.88

## References

1. Kanorovich L.V. (1939) *Mathematical methods of organization and planning of production*. Leningrad: Leningrad State University Press (in Russian).
2. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2022) Creating a supercomputer simulation of society with active agents of different types and its testing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, vol. 92, no. 5, pp. 458–466 (in Russian).
3. Kolev M., Georgiadou S. (2022) On simulation and modeling in economics. *Asian-European Journal of Mathematics*, vol. 15, no. 10, article 2250239. <https://doi.org/10.1142/s1793557122502394>
4. Davydov I., Kochetov Yu., Tolstykh D., et al. (2023) Hybrid variable neighborhood search for automated warehouse scheduling. *Optimization Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 2185–2199. <https://doi.org/10.1007/s11590-022-01921-6>
5. Chistyakova T.B., Shashikhina O.E. (2022) Intelligent software complex for modeling the process of planning multi-assortment industrial productions. *Applied Informatics*, vol. 17, no. 5(101), pp. 41–50 (in Russian). <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-5-41-50>
6. Beklaryan L.A., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. (2024) Dynamic and agent-based models of intelligent transport systems. *Economics and Mathematical Methods*, vol. 60, no. 2, pp. 105–122 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0424738824020091>
7. Mochurad L., Boyko N., Sheketa V. (2020) Parallelization of the method of simulated annealing when solving multicriteria optimization problems. Proceedings of the *CEUR Workshop*, Lviv, May 21, 2020, pp. 12–24.
8. Arrow K.J. (2008) George Dantzig in the development of economic analysis. *Discrete Optimization*, vol. 5, no. 2, pp. 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2006.11.007>
9. Ratushnyi A., Kochetov Y. (2021) A column generation based heuristic for a temporal bin packing problem. Proceedings of the *20th International Conference Mathematical Optimization Theory and Operations Research (MOTOR 2021)*, Irkutsk, Russia, July 5–10, 2021 (eds. P. Pardalos, M. Khachay, A. Kazakov), Lecture Notes in Computer Science, vol. 12755, pp. 96–110. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77876-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77876-7_7)
10. Kochetov Yu.A., Shamray N.B. (2021) Optimization of placement and relocation of emergency medical teams. *Discrete Analysis and Operation Research*, vol. 28, no. 2(148), pp. 5–34 (in Russian). <https://doi.org/10.33048/daio.2021.28.702>
11. Kovesnikov V.A., Mehtiev A.Ya. (2020) Study of the accumulative-sorting method for solving parametric optimization problems. *Control Issues*, no. 2, pp. 28–35 (in Russian). <https://doi.org/10.25728/pu.2020.2.3>
12. Manne A.S. (1958) A linear programming model of the U.S. petroleum refining industry. *Econometrica*, no. 26, pp. 67–196.
13. Chenery H.B. (1949) Engineering production functions. *The Quarterly Journal of Economics*, no. 63, pp. 507–531.
14. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2021) Digital plant: methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. *Business Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
15. Scarf H.E. (1990) Mathematical programming and economic theory. *Operations Research*, vol. 38, no. 3, pp. 377–385.
16. Apalkova T.G., Kosorukov O.A., Mishchenko A.V., Tsourkov V.I. (2024) Mathematical models for managing the production and financial activities of an enterprise. *Herald of the Russian Academy of Sciences. Theory and Systems of Control*, no. 2, pp. 107–129. <https://doi.org/10.31857/S0002338824020109>
17. Gergel V., Grishagin V., Liniyov A., Shumikhin S. (2021) Parallel computations in integrated environment of engineering modeling and global optimization. Proceedings of the *16th International Conference (PaCT 2021)*, Kaliningrad, Russia, September 13–18, 2021 (ed. V. Malyshekin), Lecture Notes in Computer Science, vol. 12942, pp. 413–419. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86359-3\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86359-3_31)
18. Gergel V., Kozinov E. (2021) Parallel computations for solving multicriteria mixed-integer optimization problems. *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1437, pp. 92–107. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81691-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81691-9_7)
19. Shichkina Y., Kupriyanov M., Awadh AM.M.H. (2020) Application of methods for optimizing parallel algorithms for solving problems of distributed computing systems. Proceedings of the *International Conference on Cyber-Physical Systems and Control (CPS&C'2019)*, St. Petersburg, Russia, June 10–12, 2019 (eds. D. Arseniev, L. Overmeyer, H. Kälviäinen, B. Katalinić), Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 95, pp. 212–224. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7_21)
20. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Strelkovskii N.V. (2022) Simulation of migration and demographic processes using FLAME GPU. *Business Informatics*, vol. 16, no. 1, pp. 7–21. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.1.7.21>
21. Beklaryan A.L., Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2021) Implementation of the Deffuant model within the FLAME GPU framework. *Advances in Systems Science and Applications*, vol. 21, no. 4, pp. 87–99. <https://doi.org/10.25728/assa.2021.21.4.1161>
22. Coutinho D.A.M., Lins e Silva F.O., Aloise D., Xavier-de-Souza S. (2019) A scalable shared-memory parallel simplex for large-scale linear programming. *arXiv:1804.04737v2*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.04737>
23. Mochurad L. (2020) Parallelization of the Simplex method based on the OpenMP technology. Proceedings of the *4th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2020)*, Lviv, Ukraine, April 23–24, 2020, pp. 952–963.

24. Hall J.A.J. (2010) Towards a practical parallelization of the Simplex method. *Computational Management Science*, vol. 7, pp. 139–170. <https://doi.org/10.1007/s10287-008-0080-5>
25. Bieling J. (2010) An efficient GPU implementation of the revised simplex method. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Parallel Distributed Processing, Workshops and PhD Forum (IPDPSW), Atlanta, GA, USA*, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2010.5470831>
26. Bazaraa M.S., Jarvis J.J., Sherali H.D. (2010) *Linear Programming and Network Flows*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
27. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa (2025) *LP random problem generator*. Available at: <https://web.tecnico.ulisboa.pt/~mcasquilho/compute/or/Fx-LP-generator.php> (accessed 20 April 2025).

### About the authors

#### **Yuriy S. Ezrokh**

Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor;

Head of Department, Department of Economic Informatics, Novosibirsk State Technical University, 6, Karl Marx St., Novosibirsk 630073, Russia;

E-mail: [ezrokh@corp.nstu.ru](mailto:ezrokh@corp.nstu.ru)

ORCID: 0000-0002-8367-1840

#### **Alexey V. Snytnikov**

Doctor of Sciences (Technology);

Professor, Department of Applied Informatics, Kaliningrad State Technical University, 1, Sovetskiy Ave., Kaliningrad 236022, Russia;

E-mail: [aleksej.snytnikov@klgtu.ru](mailto:aleksej.snytnikov@klgtu.ru)

ORCID: 0000-0003-4111-308X

#### **Elena Yu. Skorobogatykh**

Candidate of Sciences (Pedagogy), Associate Professor;

Associate Professor, Department of Applied Informatics, Kaliningrad State Technical University, 1, Sovetskiy Ave., Kaliningrad 236022, Russia;

E-mail: [elena.skorobogatykh@klgtu.ru](mailto:elena.skorobogatykh@klgtu.ru)

ORCID: 0000-0001-6050-4831

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.89.101

# Экосистемный подход к стратегическому управлению на примере сельского хозяйства

**В.И. Будзко** 

E-mail: vbudzko@ipiran.ru

**В.И. Меденников** 

E-mail: dommed@mail.ru

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия

## Аннотация

В статье рассматривается трансформация методов и моделей стратегического управления на основе экосистемного подхода в рамках формирования единой цифровой платформы управления экономикой. Экосистемный подход к социально-экономическому развитию общества приобретает все большую популярность, что продиктовано общемировым социальным заказом на защиту окружающей среды и бережное отношение к использованию ограниченных природных ресурсов. Экологические проблемы в сельском хозяйстве России нарастают, в частности, из-за активного процесса формирования агропромышленных объединений, в основном в виде агрохолдингов. При этом возникает проблема системного подхода к применению технологий интеграции всех видов производственных ресурсов, с учетом роста числа факторов внешней среды и их значимости. В качестве основного метода исследования процессов стратегического управления предлагается математическое моделирование, которое, в отличие от большинства используемых моделей, которые часто носят иконографический вид, позволяет учесть значительно большее число факторов и дает возможность в режиме имитации рассчитывать различные варианты развития объектов моделирования. В результате была разработана математическая модель стратегического управления агрохолдинга в целях его устойчивого развития. Показано, что разработка стратегии развития должна осуществляться в тесной увязке с внедрением соответствующей автоматизированной системы управления холдингом, что приведет к коренному изменению всей системы управления и производства. В свою очередь, это позволит объединению, следуя мировым тенденциям, при стратегическом целеполагании ориентироваться в первую очередь на качество, прослеживаемость и другие составляющие конкурентоспособности. Предложенная математическая модель предоставляет

научное обоснование единых методов цифровизации в долгосрочном плане как больших многоотраслевых аграрных объединений, так и средних и малых хозяйств, которые могут работать с агрохолдингами на принципах аутсорсинга.

**Ключевые слова:** стратегическое управление, экосистема, сельское хозяйство, цифровая платформа управления

**Цитирование:** Будзко В.И., Меденников В.И. Экосистемный подход к стратегическому управлению на примере сельского хозяйства // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 2. С. 89–101. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.89.101

### Введение

Экосистема как научное понятие было привнесено биологией, где под ней понимается система как симбиоз ее физических объектов и биологических организмов в некоторой среде их обитания, в которой они взаимозависимы и эффективно взаимодействуют [1–3]. Экосистемный подход – это основанная на новых цифровых решениях концепция повышения эффективности управляющих воздействий в сфере защиты окружающей среды. Конечная цель – передать потомкам как можно больше природных ресурсов с уменьшением экологических нагрузок на человечество и природную среду.

Природную экосистему можно определить как некую систему, состоящую из живых и неживых элементов, взаимодействующих друг с другом на определенных пространственных площадях [4]. При переносе понятия экосистемы на социально-экономические системы первая часть этого термина («эко») описывает среду некоторой организационной структуры, а вторая («система») характеризует с точки зрения теории систем взаимосвязь ее элементов, функционирующих по установленным правилам. Таким образом, в социально-экономических исследованиях экосистема задается экзогенно заданными элементами окружающей среды и составом агентов, эндогенно действующих совместно в виде системы по ее правилам, что приносит выгоду участникам от такого взаимодействия [5, 6].

В настоящее время исследования в области использования экосистемного подхода применитель-

но к социально-экономическому развитию человечества приобретают особую актуальность в связи с резко обострившимся общемировым социальным запросом на защиту окружающей среды, а также на более эффективное и экологичное расходование убывающих природных ресурсов. Подтверждением этому стало создание Генеральной Ассамблеей ООН в 1987 году Международной комиссии по окружающей среде и развитию, разработавшей концепцию устойчивого экологически чистого развития всего мирового сообщества. Помимо упомянутого выше социального заказа в концепции нашли отражение и прочие комплементарные факторы: демографические, финансовые и социальные.

Экологические проблемы в России нарастают. В сельском хозяйстве снизился контроль регулирующих органов за соблюдением норм сохранения плодородия почв. Несоблюдение правил ведения севооборотов и повсеместное использование на полях химических удобрений и средств против болезней и вредителей в целях увеличения как объема товарной продукции, так и ее прибыльности пагубно отражается не только на вредных, но и на взаимодействующих с ними полезных организмах. Такое пагубное влияние на ЭС и несоблюдение правил нахождения почв в равновесном состоянии, имеющее место в течение довольно длительного времени, превращает почву в склад ядохимикатов с дальнейшей передачей их через культуры и животных самому человеку. Так, в публикации [7] сообщается, что в России за год происходит деградация порядка 2 млн гектар угодий, что приводит к потерям продукции в размере 3,9 млн т., в связи с чем плодородие черноземов в центральной части России за десять последних лет сократилось почти вдвое.

Ведение севооборотов с обеспечением необходимого уровня прибыли сельхозпроизводителя требует разработки долгосрочных и текущих планов, а также их последующей регулярной корректировки и управления с учетом меняющихся условий. Для каждого отдельного предприятия разработка индивидуального цифрового инструмента решения данной задачи невозможна, ввиду возросшего числа факторов внутренней и внешней среды. Поэтому необходим некий аналог системы автоматизированного проектирования. Обеспечить информационную поддержку такого процесса должна комплексная автоматизированная система управления (АСУ). При ее построении в полной мере применим экосистемный подход. В то же время, поскольку рыночные отношения требуют поиска наиболее рациональных решений при определении направлений деятельности, при построении АСУ необходимо использовать лучшие методики и подходы, разработанные в области стратегического управления. Концепция устойчивого экологически чистого развития наряду с обострившейся политической и экономической неустойчивостью во всем мире в последнее десятилетие привела к активным исследованиям в области стратегического управления. Поэтому комплексное управление севооборотом выражается в создании бизнес-экосистем с элементами стратегического управления [8].

### 1. Модели и методы стратегического управления

Теория управления фирмой привела к становлению стратегического управления как самостоятельного цельного научного направления [9, 10]. Планирование, рассмотренное в этих работах, имело краткосрочный годовой горизонт, что объясняется как общей экономической стабильностью в развитых странах, в частности, во взаимоотношениях со внешним миром (средой) и обеспечением различными ресурсами. Расширение горизонта планирования с одного года до нескольких лет явилось следствием нарастания проблем влияния различных факторов внешней среды на работу бизнеса.

Ускоренное развитие науки, технологий и техники, а также глобализация экономики (возникновение производств с распределенными по всему миру участками сборки отдельных компонентов изделий) вынуждают большинство фирм заниматься долгосрочным планированием и соответствующим управлением. Развитие концепции стратеги-

ческого управления стало результатом подобных тенденций и всплеска исследований в данной сфере. Среди наиболее известных зарубежных ученых, работавших в этом направлении, можно отметить таких специалистов, как А.Дж. Стрикленд и А.А. Томпсон [11], а также Г. Минцберг, М. Альберт, М. Портер, К. Боумэн, У. Кинг, П. Друкер, И. Ансофф, М. Мескон, Ф. Хедоури, Д. Клиланд, Б. Альстрэнд, Дж. Лэмпел, А. Чандлер. Среди российских исследователей могут быть отмечены О.С. Виханский [12], Л.С. Шеховцева [13], Д.В. Терехова-Пушная [14] и некоторые другие.

С течением времени модели стратегического управления подвергались различным модификациям [13]. В результате эволюции появилось большое число моделей, описание которых носит графический характер. Часто различие моделей заключалось лишь в числе и содержании последовательных этапов описания процессов стратегического управления. При этом все модели обладают некоторыми общими характеристиками этапов стратегического управления, к числу которых относятся:

- ◆ целеполагание деятельности фирмы;
- ◆ выявление задач, направленных на достижение стратегических целей;
- ◆ выбор из некоторого множества задач, являющихся наиболее важными (оптимальными) с точки зрения достижения стратегических целей;
- ◆ имплементация выбранных задач;
- ◆ мониторинг, анализ и оценка реализации утвержденных траекторий развития, направленных на достижение стратегических целей.

Во всех моделях важнейшей функцией стратегического управления (которая понадобится нам в дальнейшем) является анализ внутренних ресурсов, а также значимых для компаний проявлений внешней среды, отражающих экономико-социальные, политические, экологические, технологические и некоторые другие факторы. Как показывают события последнего времени, внешняя среда приобретает все более динамичный характер, заставляя искать ответы на многие вопросы:

- ◆ каков портрет будущего покупателя продукции компании;
- ◆ насколько продукция компании заменяема аналогичной продукцией других фирм, с учетом финансового состояния покупателей в будущем;

- ◆ каково ценовое распределение товаров в зависимости от региональной заработной платы, объемов поставок и уровня развития логистики;
- ◆ каков уровень и тенденции развития прослеживаемости продукции в части требований населения, бизнеса и регуляторов к качеству, безопасности для здоровья, дизайну и возможным новым характеристикам;
- ◆ каковы условия получения кредитов и их влияние на стоимость товаров и уровень конкуренции, включая ее динамику и ожидаемые формы;
- ◆ степень и качество внедрения цифровых технологий у ожидаемых конкурентов;
- ◆ прогнозная оценка тенденций нормотворчества государственных органов, влияющих на сферу интересов фирмы.

В результате многочисленных попыток различных организаций учесть большинство из перечисленных факторов внешней среды появилась теория бизнес-экосистем [8].

## 2. Методы стратегического управления на базе единой цифровой платформы

В работе [8] основоположник теории бизнес-экосистем Джеймс Ф. Мур определяет их следующим образом. По аналогии с природными экосистемами бизнес-экосистема характеризуется как хозяйственное сообщество, включающее в сферу своей деятельности (по некоторым критериям, как это принято в системном анализе) группу взаимодействующих акторов (организаций и индивидов) из мира бизнеса. То есть экосистема любой организации состоит как из собственных структурных подразделений, так и из смежников – поставщиков и потребителей сырья, комплектующих, ус-

луг, разного уровня посредников, представляющих участников цепочек добавленной стоимости, а также всевозможные ведомства, органы, учреждения, следящие за соблюдением стандартов, нормативов и законов. На современном этапе развития экономики в экосистему принято также включать конкурирующие компании и другие структуры, оказывающие или могущие оказывать значащее влияние на организацию. При этом влияние всех элементов на экосистему необходимо учитывать на всех уровнях управления, на основе соответствующего информационного взаимодействия.

В работах [7, 15, 16] исследуется единая производственная цифровая платформа управления (ЦПУ) в целях формирования типовой АСУ многоотраслевых сельскохозяйственных предприятий. В свете вышеприведенных аргументов такая платформа претендует на роль цифрового инструмента, способного воплотить концепцию бизнес-экосистем на практике. Исходя же из рассмотренных свойств ЦПУ, можно констатировать, что она также является основой для разработки системы стратегического управления. Данная платформа состоит из трех основных подплатформ, которые могли бы быть приняты как цифровые облачные стандарты, в следующем виде:

- ◆ сбор, передача и хранение первичной учетной информации (рис. 1);
- ◆ база данных технологической информации (рис. 2);
- ◆ база знаний, отражающая алгоритмическое обеспечение управленческих функций (в растениеводстве онтологически выделено 240 типовых алгоритмов).

На рисунке 2 в качестве примера приведена укрупненная модульная информационная модель растениеводства.

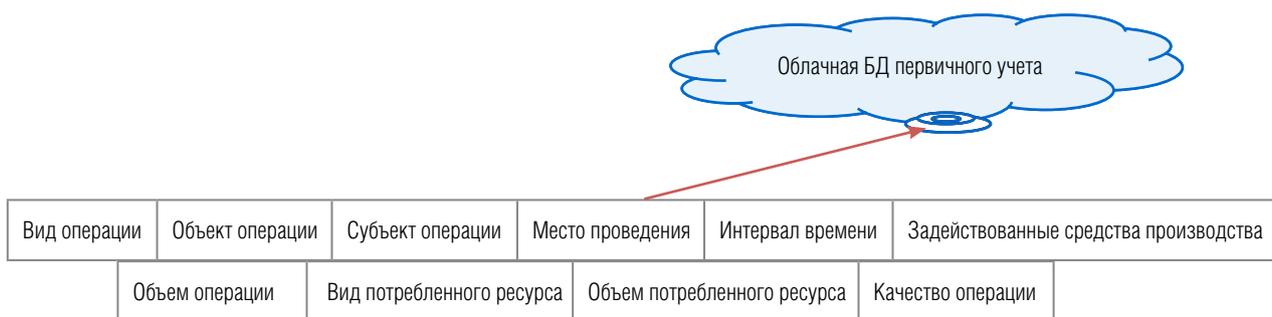


Рис. 1. Модули подплатформы сбора, передачи и хранения первичной учетной информации.

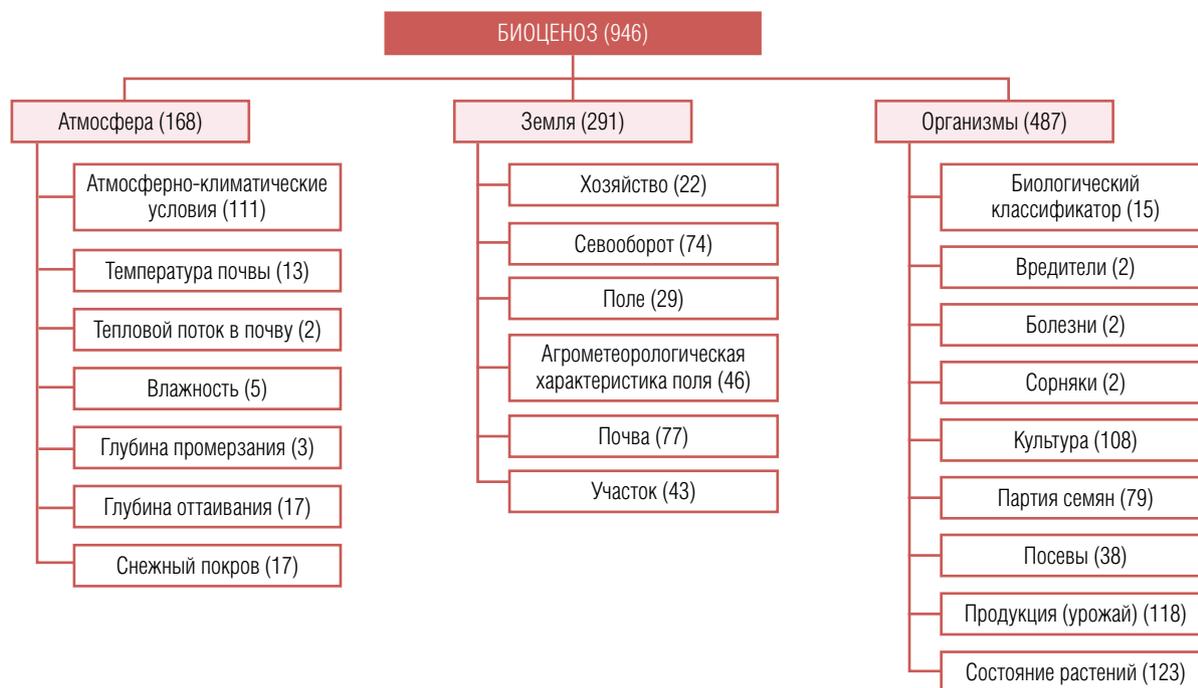


Рис. 2. Укрупненная модульная информационная модель растениеводства.

Заметим, что подплатформа сбора, передачи и хранения первичной учетной информации носит межотраслевой универсальный характер для основных производственных отраслей страны. Следующие две подплатформы отражают только цифровые стандарты конкретной отрасли. ЦПУ также содержит все справочники и классификаторы, необходимые для алгоритмов управленческих задач. Заметим, что универсальность первой подплатформы, реализованной в виде соответствующего инструментария, проявляется в удобстве хранения всех совершенных технологических операций и всей собранной информации с помощью интернета вещей. Это может служить подтверждением аргумента академика В.М. Глушкова в пользу проекта ОГАС («обогнать, не догоняя») поскольку концептуально ЦПУ намного опередила зарубежный подход к цифровизации экономики [17, 18]. Это проявилось в утверждении компании J'son & Partners Consulting о том, что в настоящее время в сельскохозяйственной сфере США дают ростки лишь две специфические подплатформы: агрегаторы сбора и накопления первичных данных и подплатформы задач-приложений [19].

Рассмотрим последствия перехода на АСУ, реализованную на единой ЦПУ, в отношении разработки различных систем стратегического управления.

Как было отмечено выше, бизнес-экосистема любого предприятия включает много экономических агентов, так или иначе контактирующих с ним, а также правительственные и регулирующие органы, обеспечивающие соблюдение законов и стандартов. Нарастающие интеграционные тенденции цифровой экономики существенно усиливают данную взаимосвязь, среди многих видов которой можно отметить требования рыночных агентов и частных покупателей получать информацию в онлайн-виде о различных характеристиках товаров (например, в России активно развивается система «Честный знак»). Такие требования на базе интеграционных технологий цифровой экономики получили воплощение в концепции прослеживаемости товаров и услуг. Цифровой инструмент, реализующий концепцию прослеживаемости, позволяет предоставлять адекватную информацию о производителе, составе товара с качественными, ценовыми и стоимостными показателями, о дате производства и годности, а также прочих данных не только участникам производственных и логистических цепочек, но и всем заинтересованным лицам, включая контролирующие органы. Следствием распространения и совершенствования этого инструмента является изменение потребительских

моделей поведения населения развитых в цифровом плане государств в направлении выбора более качественных и безопасных товаров, лекарств и продуктов питания. Как следует из рассмотренных характеристик и возможностей ЦПУ, таким идеальным инструментом обеспечения прослеживаемости товаров и услуг является АСУ на ее основе [20], также интегрирующая и единую цифровую платформу управления логистикой [21] на базе той же ЦПУ (рис. 3).

Более того, можно сделать вывод, что ЦПУ в сочетании с рядом других цифровых технологий, например, искусственным интеллектом дает возможность надежно и объективно рассчитать индивидуальный вклад каждого участника цепочки добавленной стоимости в себестоимость продукции. Из этого следует, что бизнес-поведение всех участников цепочки претерпит существенную трансформацию, вызванную полной информированностью о реальном вкладе любого из участников при передаче своей продукции в цепочку [20]. Если же заглянуть лет на 15–20 вперед, когда ЦПУ получит признание своей практической эффективности, то можно предсказать, что данная платформа станет инструментом смены сервисной модели социально-экономических отношений на продуктовую модель поведения всего общества [22].

### 3. Методы стратегического управления агропромышленным объединением на базе единой цифровой платформы

Научный интерес к стратегическому управлению в сельском хозяйстве России обусловлен, помимо задач общего характера, нарастающими экологическими проблемами и снижением плодородия почв. Этот интерес также подогревается происходящими структурными реформами, в результате которых наблюдается резкий рост аграрных холдингов, объединяющих предприятия из разных отраслей и регионов, отличающихся уровнем развития. Основным доминирующим мотивом их создания является потребность в интеграции сельскохозяйственных организаций с более рентабельными животноводческими (например, птицеводческими) фабриками и перерабатывающими предприятиями. Этим предприятиям подобная схема взаимоотношений гарантирует доступ к более дешевому по сравнению с рыночными ценами сырью и необходимую технологическую стабильность. Зачастую эти предприятия являются инициаторами подобной интеграции, что приводит к сокращению участия рыночных посредников в цепочках поставок, а при организации собственных торговых сетей – к реализации принципа «от поля

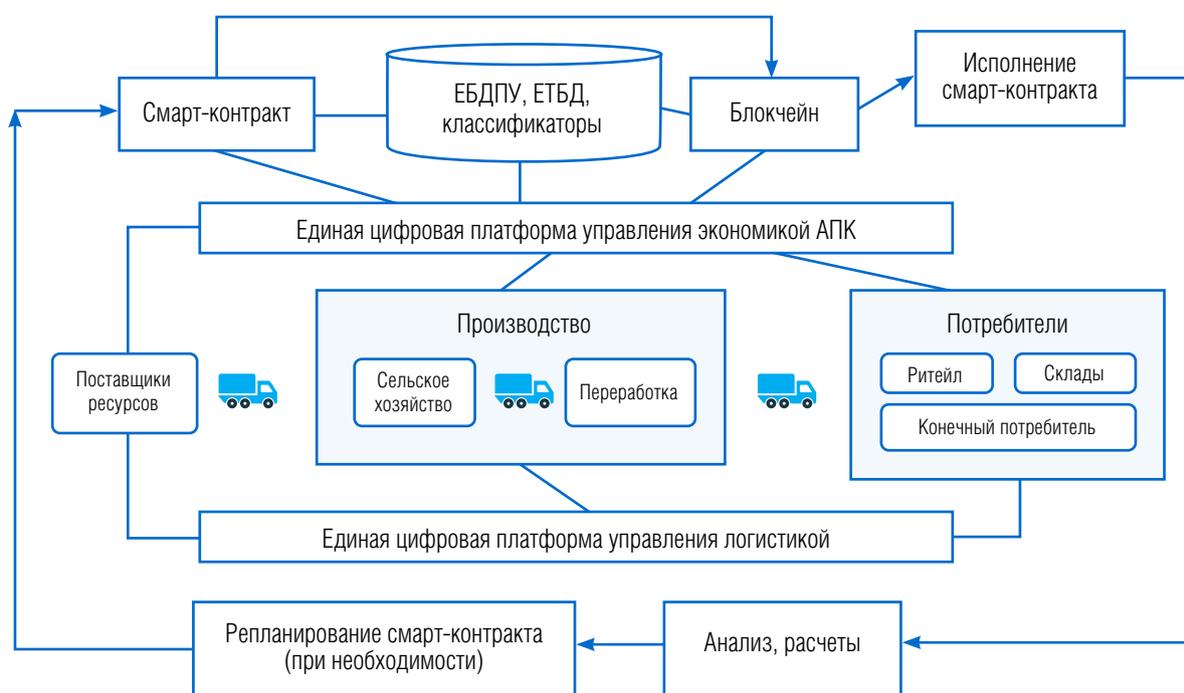


Рис. 3. Схема реализации прослеживаемости продукции в рамках единой АСУ на базе ЦПУ.

до прилавка», что похоже на подобные тенденции и в зарубежных странах.

При этом создание холдингов порождает ряд проблем, связанных с выравниванием производственного потенциала и обеспечением эффективной интеграции всех ресурсов (материальных, трудовых, финансовых, а также актуальных в эпоху цифровой экономики цифровых ресурсов) при формировании оптимальных логистических цепей.

Для разрешения перечисленных проблем перейдем к обсуждению модели стратегического управления аграрным холдингом, учитывая его интеграционные тенденции.

Как уже упоминалось, в состав холдингов входят предприятия растениеводческой, животноводческой и перерабатывающей отраслей АПК. Для сокращения модели при ее описании не будем учитывать второстепенные отрасли, реализующие вспомогательные функции, а их влияние на общие затраты будем учитывать в составе основных отраслей. Однако в последующем, считая, что холдинг полностью перешел на ЦПУ, является обязательным включение в модель блока логистики, как важной составляющей интеграционных процессов. Далее будем считать, что для перерабатывающих предприятий сырьем служит лишь продукция растениеводства и животноводства, а для животноводческой отрасли – только продукция растениеводства (хотя, на практике некоторые отходы переработки входят в кормовой рацион некоторых животных).

В силу достаточно жестких севооборотных требований производить набор растениеводческих культур только для потребностей животноводческой и перерабатывающей отраслей на практике невозможно. Поэтому произведенная дополнительная продукция должна поставляться либо на рынок, либо на переработку. На *рисунке 4* приведена схема факторов, учитываемых при разработке системы стратегического управления агрохолдингом.

С учетом описанных предположений ставится задача определить оптимальную перспективную структуру производства конечной продукции холдинга. Это даст возможность максимизировать прибыль при условии применения эффективных интеграционных технологий относительно всех используемых в производстве ресурсов. При этом необходимо учитывать инвестиции в экономику, технологии производства, а также механизмы достижения необходимого уровня конкурентоспособности продукции (*рис. 5*). На следующем этапе стратегического управления это позволит сформировать программу переходного процесса из первоначального состояния агрохолдинга в конечное, полученное как результат стратегического планирования первого этапа [23].

Известно, что основные процессы сельскохозяйственного производства определяются структурой научно обоснованных севооборотов [24]. От выбора севооборотов зависят технологии обработки земель и ухода за посадками, состав мероприятий по



Рис. 4. Факторы, учитываемые при стратегическом управлении агрохолдингом.

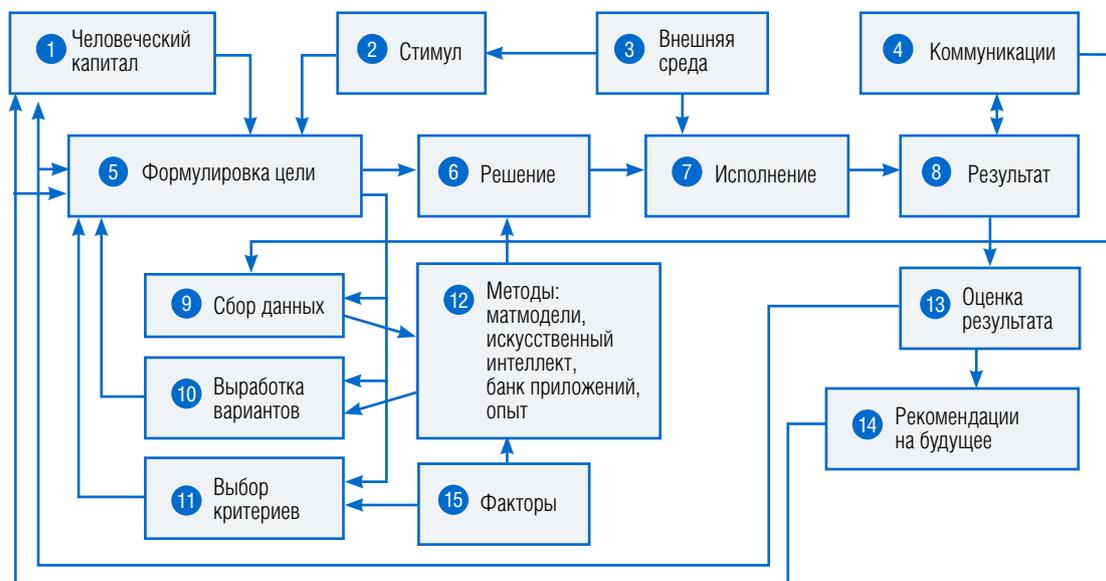


Рис. 5. Блок-схема стратегического управления холдинга.

защите культурных растений, перечень планируемых к использованию химических средств, марки и номенклатура используемых технических средств, структура и территориальное распределение складов и производственных строений и т.д. Можно сказать, что от выбранной структуры севооборота, в которой главным ресурсом является земля, зависит конечный результат всего аграрного производства. Севооборот позволяет рационально и эффективно использовать и другие ресурсы, применяемые для выращивания культур. Поэтому формированию систем стратегического управления агрохолдингов должна предшествовать разработка научно обоснованных севооборотов, математическая модель которых представлена в работе [25].

По этой причине все технологические процессы должны быть взаимосвязаны как информационно, так и алгоритмически, в соответствии с интеграционными принципами. Это же относится и к логистике, цифровые технологии которой должны быть связующим звеном всех элементов севооборота — поставщиков материалов, топлива и химикатов, временных пунктов хранения (складских помещений, силосных емкостей, сенажных башен, зерновых токов), всевозможных потребителей продукции растениеводства (животноводческих ферм, перерабатывающих и комбикормовых заводов, элеваторов, торговли), а также самих транспортников. Актуальность рассмотрения логистики в качестве элемента севооборота с целью ее оптимизации

подтверждается данными об огромных затратах на нее в России — примерно 20% от ВВП [21] (для сравнения, в Европейском Союзе затраты ниже в 2,5 раза).

Рассмотрим механизм встраивания блока логистики в модель стратегического управления, поскольку он оказывает значительное влияние на межрегиональную и внутрихозяйственную жизнь агрохолдинга. Ввиду нелинейного поведения логистической модели, использование логистического блока при проектировании севооборотов целесообразно в имитационном режиме (рис. 6), один из вариантов которого рассмотрен в работе [21].

Рассмотренная в работе [25] математическая модель стратегического управления относится к статическим линейным моделям, которые в силу имеющегося мощного математического аппарата применяются в подавляющем большинстве исследований в области стратегического планирования. Хотя сельское хозяйство является слабоструктурированной системой со значимыми нелинейными зависимостями, их формализация довольно сложна. Например, принцип Либиха, представленный немецким ученым Юстусом фон Либихом еще в 1840 году, задействован до сих пор, и ни искусственный интеллект, ни математические нелинейные методы не могут его превзойти. На практике, по словам академика А.А. Дородницына, свыше 98% математических моделей являются линейными. Например, еще в 1970 г. для опровержения



Рис. 6. Схема встраивания блока логистики в модель стратегического управления.

утверждения Нобелевского лауреата Роберта Солоу об отсутствии экономического эффекта при компьютеризации экономики, компанией Economist Intelligence Unit была использована простая функция Кобба–Дугласа, становящаяся линейной после ее логарифмирования.

Однако, при таком подходе возникает самая серьезная проблема в задачах моделирования стратегического управления, состоящая в поиске оптимального процесса перехода из заранее известного начального состояния системы в целевое состояние, определенное при стратегическом планировании. Обычно в большинстве работ под стратегическим управлением понимается только построение плана на перспективу. В нашем исследовании опять сошлемся на работу [25], в которой приведена математическая модель именно второго этапа оптимизации переходных процессов.

### Заключение

В работе обосновывается подход к оптимизации стратегического управления в аграрном производстве. Основу этого подхода составляет автоматизированная система управления, которая должна создаваться в каждом холдинге на основе единой ЦПУ производством. После ее внедрения в отдельных агропромышленных холдингах подход может быть распространен на остальные предприятия и хозяйства, которые могли бы при этом выступать в роли дополнительных звеньев в глобальных цепочках поставок холдингов на принципах аутсорсинга. Построение АСУ предприятий на единой ЦПУ позволит осуществить эффективный переход к органическому земледелию с минимизацией экологических рисков, обусловленных вредным воздействием на продукцию АПК как природных, так и человеческих факторов.

Успешное внедрение реализованных в ЦПУ решений требует наличия структурированной и онтологически выверенной информации: о совершенных технологических операциях (например, с применением интернета вещей), результатах мониторинга, данных о состоянии культурных и вредных растений и почвы, сведений о необходимом объеме применения техники и химических средств, а также другой информации, хранимой в базе данных ЦПУ, необходимой для реализации технологий земледелия. Так, в растениеводстве практически для каждого культурного растения разрабатываются экспериментальные технологии внесения питания и защиты. Вся эта информация должна собираться и использоваться, но задача осложняется отказом крупных предприятий давать нужную информацию даже Министерству сельского хозяйства. Это наглядно проявилось при попытках апробировать модель на практике с учетом накопленного опыта в рамках программы «Электронизация сельского хозяйства», в сотрудничестве с экспертами Кубанского НИИ сельского хозяйства, имеющего большой многолетний экспериментальный материал по формированию севооборотов.

Апробация модели была проведена в одном из хозяйств Краснодарского края, имеющем свыше 7 тыс. га земель, относящимся к двум группам, для которых имелись рекомендации по использованию севооборота. Внедрение, документально подтвержденное ГКНТ, показало экономический эффект увеличения урожайности зерновых и зернобобовых на 4 ц/га без дополнительных затрат.

Данный опыт показал, что нарушения эксплуатации севооборота в России и отсутствие необходимого учета технологических операций на полях не позволяют собирать требуемую для модели исходную информацию. Хотя высокоразвитое сельское хозяйство Кубани значительно превосходит в информа-

ционном плане остальные регионы, для реализации полной модели не удалось собрать всей нужной информации, поэтому была реализована значительно упрощенная модель. В этом случае пришлось восстанавливать необходимые данные статистическими методами на основе информации из других хозяйств. Об этом также свидетельствуют исследования, показавшие, что в настоящее время в отрасли свыше 85% информации сохраняется либо в бумажном виде, либо в формате электронных таблиц. При этом во многих хозяйствах необходимая информация вообще не хранится.

По этой причине модель не исследовалась на чувствительность: гораздо важнее было проверить ее влияние при формировании севооборотов на выбор полей, в зависимости от сплошного или разбросного способа их размещения, поскольку это существен-

но влияет на расход топлива, временные характеристики и эффективность производства в целом. Сплошной способ используется в случае больших площадей угодий одной агроэкологической группы, расположенных на географически едином массиве и претендующих для размещения одного из севооборотов. Такая география и физико-химические свойства земли предполагают размещение всех полей непосредственно рядом друг с другом. Разбросной же способ используют в случаях, когда поля, относящихся к одной агроэкологической группе, размещают на земельных наделах, географически изолированных один от другого. Имитационные расчеты показали важность этого момента, поэтому в настоящее время ведется работа над оптимизационной моделью, которая сведена к разновидности задачи об упаковке в контейнеры. ■

### Литература

1. Будзко В.И., Меденников В.И. Системный анализ образовательных цифровых экосистем в АПК // Системы высокой доступности. 2023. № 1(19). С. 46–58.
2. Medennikov V., Flerov Y. System analysis of digital ecosystem of Russian agriculture // IEEE Xplore Digital Library. 15 International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). 2022. Moscow, Russia.
3. Раменская Л.А. Применение концепции экосистем в экономико-управленческих исследованиях // Управленец. 2020. № 4(11). С. 16–28.
4. Tansley A. The use and abuse of vegetational concepts and terms // Vegetational Concepts and Terms. 1935. P. 284–307.
5. Acs Z.J., Audretsch D.B., Lehmann E.E., Licht G. National systems of entrepreneurship // Small Business Economics. 2016. Vol. 46. No. 4. P. 527–535.
6. Acs Z.J., Audretsch D.B., Lehmann E.E., Licht G. National systems of innovation // Journal of Technology Transfer. 2017. Vol. 42. No. 5. P. 997–1008.
7. Будзко В.И., Меденников В.И. Математическая модель оптимизации структуры севооборотов на основе единой цифровой платформы управления сельскохозяйственным производством // Системы высокой доступности. 2022. № 4(18). С. 5–13.
8. Moore J. The death of competition: Leadership and strategy in the age of business ecosystems. Harper Business, 1996.
9. Тейлор Ф.У. Принципы научного менеджмента. М.: Контроллинг, 1991.
10. Файоль А. Общее и промышленное управление. М.: Контроллинг, 1992.
11. Томпсон А., Стрикленд А. Стратегический менеджмент: искусство разработки и реализации стратегии. М.: Банки и биржи, 1998.
12. Виханский О.С. Стратегическое управление: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Гардарики, 1998.
13. Шеховцева Л.С. Стратегический менеджмент. Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2006.
14. Терехова-Пушная Д.В. Модели стратегического управления и планирования // Московский экономический журнал. 2019. № 9. С. 488–497.
15. Экономические и управленческие проблемы землеустройства и землепользования в регионе / Н.А. Алексева и [др.]. Ижевск: Шелест, 2022.
16. Меденников В.И. Математическая модель формирования цифровых платформ управления экономикой страны // Цифровая экономика. 2019. № 1(5). С. 25–35.
17. Глушков В.М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС. М.: Статистика, 1975.
18. Benjamin P. How not to network a nation: The uneasy history of the Soviet Internet. The MIT Press, 2016.

19. Анализ рынка облачных IoT-платформ и приложений для цифрового сельского хозяйства в мире и перспектив в России // J'son & Partners Consulting. 2018. [Электронный ресурс]: <https://json.tv/analytic/analiz-rynka-oblachnyh-iot-platform-i-prilojeniy-dlya-tsifrovogo-selskogo-hozyaystva-v-mire-i-perspektiv-v-rossii-20180925034341/> (дата обращения 18.06.2025).
20. Kulba V., Medennikov V. Product traceability digital tool powered by mathematical model for logistics digital platform // IEEE Xplore Digital Library. 15 International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). 2022. Moscow, Russia.
21. Budzko V., Medennikov V., Keyer P. The logistics component of the geographic reference of the formed promising crop rotations // BIO Web of Conferences. 2023. Vol. 66. Article 03002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236603002>
22. Меденников В.И. Эволюционные этапы экосистемного подхода к управлению экономикой в цифровую эпоху // Управленческий учет. 2024. № 7. С. 310–318.
23. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление. М.: Советское радио, 1976.
24. Евтефеев Ю.В., Казанцев Г.М. Основы агрономии: учебное пособие. М.: ФОРУМ, 2013.
25. Кульба В.В., Меденников В.И. Учет региональных особенностей стратегического управления агропромышленными интегрированными формированиями в едином пространстве цифрового взаимодействия // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD>2021): Труды Четырнадцатой международной конференции, Москва, 27–29 сентября 2021 года. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2021. С. 70–82.

### Об авторах

#### **Будзко Владимир Игоревич**

доктор технических наук, академик Академии криптографии Российской Федерации;

главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Россия, 119333, г. Москва, улица Вавилова, д. 44-2;

E-mail: vbudzko@ipiran.ru

ORCID: 0000-0002-8235-0404

#### **Меденников Виктор Иванович**

доктор технических наук;

ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Россия, 119333, г. Москва, улица Вавилова, д. 44-2;

E-mail: dommed@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4485-7132

# Ecosystem approach to strategic management on the example of agriculture

## **Vladimir I. Budzko**

E-mail: vbudzko@ipiran.ru

## **Viktor I. Medennikov**

E-mail: dommed@mail.ru

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## Abstract

This paper considers the transformation of methods and models of strategic management based on the ecosystem approach within the framework of the formation of a unified digital platform for management. The ecosystem approach to the socio-economic development of society is gaining popularity as a result of global social requirements for environmental protection and a careful attitude to use of limited natural resources. Environmental problems in the Russian agricultural sector are increasing, in particular due to the process of formation of agro-industrial associations, mainly in the form of agricultural holdings. In this case, there is a problem of a systematic approach to using of technologies for the integration of all types of resources involved in production, taking into account the growing number and importance of environmental factors. Mathematical modeling is proposed as the main method of strategic management research. Unlike most of the existing models, which are often iconographic, the model proposed allows us to consider a larger number of factors. This makes it possible to assess various options of the modeling objects development using a simulation approach. As a result of the research, a mathematical model of strategic management of agroholdings for sustainable development was developed. It is shown that the development strategy should be implemented considering an appropriate automated management information system. This will lead to a radical change in the whole system of management and production. It will allow the enterprise to apply strategic goal-setting, focusing first of all on quality, controllability and other components of competitiveness. The mathematical model proposed provides justification of unified methods of long-term digitalization applicable for large agricultural associations, as well as for small and medium-sized farms, which will be able to cooperate with agricultural holdings relying on the principles of outsourcing.

**Keywords:** strategic management, ecosystem, agriculture, digital management platform

**Citation:** Budzko V.I., Medennikov V.I. (2025) Ecosystem approach to strategic management on the example of agriculture. *Business Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 89–101. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.2.89.101

## References

1. Budzko V.I., Medennikov V.I. (2023) Systems analysis of educational digital ecosystems in the agro-industrial complex. *High availability systems*, no. 1(19), pp. 46–58 (in Russian).
2. Medennikov V., Flerov Y. (2022) System analysis of digital ecosystem of Russian agriculture. *IEEE Xplore Digital Library. 15 International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russia*.
3. Ramenskaya L.A. (2020) Application of the concept of ecosystems in economic and managerial research. *Manager*, no. 4(11), pp. 16–28 (in Russian).
4. Tansley A. (1935) The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Vegetational Concepts and Terms*, pp. 284–307.
5. Acs Z.J., Audretsch D.B., Lehmann E.E., Licht G. (2016) National systems of entrepreneurship. *Small Business Economics*, vol. 46, pp. 527–535.
6. Acs Z.J., Audretsch D.B., Lehmann E.E., Licht G. (2017) National systems of innovation. *Journal of Technology Transfer*, vol. 42, no. 5, pp. 997–1008.
7. Budzko V.I., Medennikov V.I. (2022) Mathematical model for optimizing crop rotation structure based on a unified digital platform for agricultural production management. *High availability systems*, no. 4(18), pp. 5–13 (in Russian).
8. Moore J. (1996) *The Death of Competition: Leadership and Strategy in the Age of Business Ecosystems*. Harper Business.
9. Taylor F.W. (1991) *Principles of scientific management*. Moscow: Controlling (in Russian).
10. Fayol A. (1992) *General and industrial management*. Moscow: Controlling (in Russian).
11. Thompson A., Strickland A. (1998) *Strategic Management: The Art of Developing and Implementing Strategy*. Moscow: Banks and Exchanges (in Russian).
12. Vikhansky O.S. (1998) *Strategic Management: Textbook*. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Gardarika (in Russian).

13. Shekhovtseva L.S. (2006) *Strategic Management*. Kaliningrad: Publishing House of the I. Kant Russian State University (in Russian).
14. Terekhova-Pushnaya D.V. (2019) Models of strategic management and planning. *Moscow Economic Journal*, no. 9, pp. 488–497 (in Russian).
15. Alekseeva N.A., Osipov A.K., Medennikov V.I., et al. (2022) *Economic and managerial problems of land management and land use in the region*. Izhevsk: Shelest (in Russian).
16. Medennikov V.I. (2019) Mathematical model of the formation of digital platforms for managing the country's economy. *Digital Economy*, no. 1(5), pp. 25–35 (in Russian).
17. Glushkov V.M. (1975) *Macroeconomic models and principles of OGAS construction*. Moscow: Statistics (in Russian).
18. Benjamin P. (2016) *How not to network a nation: The uneasy history of the Soviet Internet*. The MIT Press.
19. J'son & Partners Consulting (2018) *Analysis of the market of cloud IoT platforms and applications for digital agriculture in the world and prospects in Russia*. Available at: <https://json.tv/analytic/analiz-rynka-oblachnyh-iot-plattform-i-prilojeniy-dlya-tsifrovogo-selskogo-hozyaystva-v-mire-i-perspektiv-v-rossii-20180925034341/> (accessed 18 June 2025).
20. Kulba V., Medennikov V. (2022) Product traceability digital tool powered by mathematical model for logistics digital platform. *IEEE Xplore Digital Library. 15 International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. Moscow, Russia (in Russian).
21. Budzko V., Medennikov V., Keyer P. (2023) The logistics component of the geographic reference of the formed promising crop rotations. *BIO Web of Conferences*, vol. 66, article 03002.
22. Medennikov V.I. (2024) Evolutionary stages of the ecosystem approach to economic management in the digital era. *Management Accounting*, no. 7, pp. 310–318 (in Russian).
23. Pospelov G.S., Irikov V.A. (1976) *Program-targeted planning and management*. Moscow: Soviet radio (in Russian).
24. Evtfeev Yu.V., Kazantsev G.M. (2013) *Fundamentals of agronomy: A textbook*. Moscow: FORUM (in Russian).
25. Kulba V.V., Medennikov V.I. (2021) Taking into account regional features of strategic management of agro-industrial integrated formations in a single space of digital interaction. Proceedings of the *Fourteenth International Conference Management of the development of large-scale systems (MLSD'2021)*, Moscow, September 27–29, 2021. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, pp. 70–82 (in Russian).

### About the authors

#### Vladimir I. Budzko

Doctor of Sciences (Technology), Academician of Cryptography Academy of Russian Federation;

Chief Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2, Vavilova St., Moscow 119333, Russia;

E-mail: vbudzko@ipiran.ru

ORCID: 0000-0002-8235-0404

#### Viktor I. Medennikov

Doctor of Sciences (Technology);

Leading researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2, Vavilova St., Moscow 119333, Russia;

E-mail: dommed@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4485-7132