



ISSN 1998-0663

БИЗНЕС- ИНФОРМАТИКА

BUSINESS INFORMATICS

Т. 19 №1 — 2025



РЕКОМЕНДАТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА НА ОСНОВЕ
ТЕХНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ
ТРАНСПОРТНАЯ
СИСТЕМА

ПРОГРАММА ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ
БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

ПОКАЗАТЕЛИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
КАПИТАЛА ОРГАНИЗАЦИИ

БИЗНЕС- ИНФОРМАТИКА

Научный журнал НИУ ВШЭ

СОДЕРЖАНИЕ

К.И. Пашигорев, А.О. Резников

Модель рекомендательной системы на основе
технических событий 7

А.И. Марон, Г.Д. Файнбург

Определение последовательности реализации
проектов программы повышения эффективности
бизнес-процессов 22

Е.А. Зарипов, А.С. Акопов

Моделирование и оптимизация характеристик
интеллектуальной транспортной системы «умного города»
с использованием гибридных эволюционных алгоритмов 34

*Л.С. Мазелис, Г.В. Гренкин, К.И. Лавренюк,
А.А. Красько*

Разработка нечеткой оптимизационной модели
формирования портфеля мероприятий программы
well-being для повышения производительности
сотрудников 50

К.С. Солодухин, Г.С. Завалин, Д.В. Макарова

Оценка рисков недостижения целевых значений
показателей интеллектуального капитала организации
на основе нечеткой модели 72

М.Б. Ласкин

Метод оценки стоимости земельного участка
в составе единого объекта недвижимости
на основе теоретико-игрового подхода 93



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),
сгенерированного 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 *28590
<http://bijournal.hse.ru>
E-mail: bijournal@hse.ru

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

При перепечатке ссылка на журнал
«Бизнес-информатика» обязательна

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

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

© Национальный
исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

О ЖУРНАЛЕ

«**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

Бараннин 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

K.I. Pashigorev, A.O. Reznikov

Recommendation system model based
on technical events 7

A.I. Maron, G.D. Fainburg

Determining the sequence of project
implementation for the program of improving
the efficiency of business processes..... 22

E.A. Zaripov, A.S. Akopov

Modeling and optimization of the characteristics
of intelligent transport systems for “smart cities”
using hybrid evolutionary algorithms..... 34

L.S. Mazelis, G.V. Grenkin, K.I. Lavrenyuk, A.A. Krasko

Development of a fuzzy optimization model
for the formation of a portfolio of well-being program
activities to increase employee productivity. 50

K.S. Solodukhin, G.S. Zavalin, D.V. Makarova

Assessment of risks of failure to achieve target values
of indicators for an organization’s intellectual capital
based on a fuzzy model 72

M.B. Laskin

The method for the land plot value appraisal as part
of the single real estate object, based on game
theory approach..... 93

Vol. 19 No. 1 – 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

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

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

© HSE University

ABOUT THE JOURNAL

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

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

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

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

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

The journal is distributed both in printed and electronic forms.

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.2025.1.7.21

Модель рекомендательной системы на основе технических событий

К.И. Пашигорев 

E-mail: kipashigorev@sberbank.ru

А.О. Резников

E-mail: aoreznikov@sberbank.ru

ПАО Сбербанк, Москва, Россия

Аннотация

Рекомендательные системы широко применяются в коммерческой сфере, алгоритмы и архитектуры рекомендательных систем схожи в различных областях применения и доказали свою эффективность. Рекомендации строятся на основании профиля пользователя, манере его поведения на различных ИТ-ресурсах (ИТ – информационные технологии), а также по схожим пользователям. При этом применение рекомендательных систем в специализированных областях не распространено. Новой перспективной областью применения рекомендательных систем являются подразделения блока «Технологии» Сбера, а пользователями будут являться сами ИТ-эксперты. Рассмотрение комбинации рекомендательной системы, машинного обучения (machine learning, ML) и LLM (Large Language Model, большая языковая модель) и проектирование этих инструментов в единой системе является целью данной статьи. Объемы данных в настоящее время измеряются петабайтами (10^{15} байт) и эксабайтами (10^{18} байт), и чтобы обрабатывать даже техническую информацию (метаданные/техноданные) из окружающего ИТ-ландшафта, из используемых экспертами ИТ-систем, необходимы помощники – AI-агенты (AI – Artificial Intelligence, искусственный интеллект). В статье приводится обзор литературы в части применения рекомендательных систем в комбинации с LLM-приложениями, предлагается модель архитектуры приложения, которое из технических журналов событий формирует человекочитаемые новости. Система спроектирована для группы пользователей, которые работают с большими данными (ML-инженеры, аналитики данных и исследователи данных), представляет собой совокупность технологий рекомендательной системы, LLM и модели машинного обучения. Также в статье приводятся первые результаты проведенного исследования.

Ключевые слова: рекомендательная система, матричная факторизация, промпт-инжиниринг, LLM, AI-агенты

Цитирование: Пашигорев К.И., Резников А.О. Модель рекомендательной системы на основе технических событий // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 1. С. 7–21. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.7.21

Введение

Сегодня мы становимся свидетелями повсеместного создания и использования AI-агентов. Такие инструменты как рекомендательные системы, экспертные системы, голосовые помощники, стали обычным делом. Но для эффективного решения практических задач обособленное использование отдельных инструментов перестает быть эффективным, поэтому архитектуры систем становятся все более сложными, и в организациях проектируются комплексные системы для решения сложных задач. Случаи проектирования сложных систем будут рассмотрены далее в разделе 1.

В части комбинации технологий можно выделить популярные в настоящее время AI-агенты – цифровые помощники для выполнения комплекса задач: несколько AI-агентов смогут взаимодействовать между собой и автономно выполнять сложные задачи без вмешательства человека [1, 2], и быть его безусловным помощником. Реализация AI-агентов во всех сферах жизни, в том числе обработка человеком больших объемов разрозненных данных с помощью умных помощников является актуальной задачей ближайших лет.

Рекомендательные системы стали универсальным инструментом, применяемым в различных сферах, в том числе и несвязанных с интернетом: здравоохранение, образование, логистика, и др. Перспективным является внедрение рекомендательных систем в подразделениях Технологий. Появление мощных языковых моделей на основе архитектуры трансформеров (LLM) открыло новый подход к решению задачи обработки больших объемов данных. Используя LLM стало возможно извлекать релевантную информацию из больших объемов технических данных, что ранее было задачей, требующей значительных человеческих ресурсов; идентифицировать целевые аудитории среди сотрудников подразделения Технологий, которые могут быть заинтересованы в конкретных событиях или информации; работать с различными типами профессиональной информации, включая

метаданные, технологические события, новости из разрозненных каналов и чатов, статьи, профессиональные встречи, и др., и объединить их все в едином интерфейсе. Фокусируясь на профессиональных интересах и компетенциях сотрудников, проектируемая система сможет предоставлять более точные рекомендации и акцентировать внимание на релевантных технических событиях, не отвлекая сотрудника на неинтересные события, которые находятся за рамками его профессиональной деятельности.

Применение LLM для анализа журналов логирования было рассмотрено в [3] и [4]. Авторы рассматривают модель снижения числа аномалий, анализируя журналы логов. При этом в рассматриваемом авторами подходе присутствует ограничение на состав полей – так называемое свойство слабой адаптивности, и, как следствие, необходимость дообучения LLM в случае изменения структур входных данных. Т.е. технические данные использовались для проведения анализа и прогнозирования и имеют ограничение на входные структуры данных. С развитием LLM появляются новые сценарии работы с техническими данными, а именно оповещение конечного пользователя об актуальных для него произошедших событиях в ИТ-ландшафте. Также авторы явно указывают на другой недостаток работы моделей с журналами логов – это недостаточная интерпретируемость. При обнаружении аномалий на основе журналов интерпретируемые результаты имеют решающее значение для того, чтобы администратор и аналитики могли доверять автоматическому анализу и действовать в соответствии с ним. Модель системы, предлагаемая в данной статье, позволит интегрировать LLM в процесс промышленной разработки, гарантируя, что информация не будет утрачена и будет своевременно доставлена получателю, а также будет однозначно интерпретируема. Такой подход является новым способом применения LLM на уже существующих технических данных.

Предлагаемая модель системы также предполагает формирование портрета пользователя для кор-

ректного подбора рекомендаций. Для этого в терминологию вводятся такие понятия как портрет пользователя или профиль пользователя. Пользователями системы являются эксперты, работающие с данными – ML-инженеры, аналитики данных и исследователи данных, которые находятся внутри разнородного ИТ-ландшафта, сотни и тысячи систем которого регулярно обновляются, и в которых регулярно происходят десятки тысяч событий ежемесячно, за которыми необходимо следить.

1. Рекомендательные системы в крупных динамических ИТ-ландшафтах для фильтрации метаданных

Рекомендательные системы используются в различных сферах, которые включают как коммерческую деятельность – электронная коммерция, дистанционное образование и развлекательные платформы – эти системы способствуют подбору товаров, услуг и контента, соответствующих индивидуальным предпочтениям и поведенческим характеристикам пользователей; так и все более активно применяются для решения задач технического характера в сферах безопасности и строительства, в качестве инструмента обобщения больших текстов, и др.

В обзорной статье [5] говорится о том, что ключевым элементом, применяемым в современных информационных технологиях, является анализ данных с привлечением технологий искусственного интеллекта. Автор рассматривает машинное обучение, нейронные сети и обработку естественного языка в качестве основных элементов искусственного интеллекта, которые применяются для анализа данных.

В статье [6] автор приводит описание гибридных систем, в которых в рамках построения систем рекомендаций комбинируются различные подходы и алгоритмы для достижения более точных персонализированных рекомендаций. А также описывает преимущество такого комбинирования перед моделями совместной фильтрации и рекомендаций на основе контента. При этом автор утверждает, что гибридные системы решают проблемы холодного старта и агрегирования информации из различных источников. В статье [7] авторы дополнительно классифицируют гибридные системы на монолитные, смешанные и ансамблевые модели, определяя монолитные рекомендаторы как совокупность частей различных типов рекомендатель-

ных алгоритмов, а смешанные рекомендаторы – как комбинацию результатов всех входящих в него рекомендаторов. При этом выделяют сложность разработки таких систем, т.к. требуются значительные ресурсы и усилия.

В статье [8] авторы для целей своего исследования также используют методы обобщения и применяют на входном потоке сообщения социальных сетей, исчисляемые миллионами. Авторы рассматривают случай, что длина обобщенного топика является управляемой переменной, и далее озвучивают мнение, что автоматическое обобщение – это задача создания последовательной сокращенной версии документа, в которой изложены его основные положения. При этом в зависимости от выбранного варианта использования целевая длина конечного результата может быть выбрана относительно длины входного документа или может быть ограничена.

Авторы статьи [9] рассматривают применение LLM-приложений в строительстве для составления автоматизированных отчетов на основании технической информации, и также называют оптимизацию ресурсов в качестве одного из получаемых результатов. Авторы применяют в своей работе термин «интеллектуализация инспекции строительства», а также указывают на недостатки в исследованиях, что в настоящее время строительная инспекция в основном полагается на выполнение и анализ вручную.

Авторы статьи [10] рассматривают применение комбинации технологий машинного обучения, LLM и генеративного ИИ. Аналогично предыдущим работам авторы преследуют цель оптимизации рабочего времени экспертов в специфической области, и достигают ее с применением современных технологий. Авторы проводят исследования на модели GPT-4 (Generative Pre-trained Transformer 4) и упоминают про риск получения галлюцинаций в качестве ответов LLM, а также определяют недетерминизм (разные ответы во время разных сеансов) как дополнительный уровень сложности и непредсказуемости в процессе генерации ответов.

Авторы статьи [11] также рассматривают для решения своей задачи комбинацию LLM-приложения и RecSys (Recommender Systems, рекомендательные системы) и особенно акцентируют внимание на проблеме холодного старта, рассматривая различные варианты. Авторы называют

свою систему A-LLMRec (All-round LLM-based Recommender system), т.к. основная идея состоит в том, чтобы позволить LLM напрямую использовать коллективные знания, содержащиеся в предварительно обученной современной системе рекомендаций на основе совместной фильтрации (CF-RecSys) (CF – Collaborative Filtering, совместная фильтрация), чтобы можно было совместно использовать новые возможности LLM, а также высококачественные представления пользователей и товаров, которые уже обучены в современной системе CF-RecSys. Но эксперимент все-таки проводится не на технических данных, а с человеко-читаемыми заголовками и описаниями.

Авторы статьи [12] позиционируют свой подход как новаторский. Они подробно описывают применение мультиагентной архитектуры на базе LLM, в которой применяется такая цепочка агентов: Восприниматель (Perceive) – Учащийся (Learn) – Исполнитель (Act) – Критик (Critic) – Мыслитель (Reflect). Архитектура задействует цикл Учись (Learn) – Действуй (Act) – Критикуй (Critic) и механизм рефлексии для повышения эффективности взаимодействия с пользователями. Как и в ранее рассмотренных статьях авторы этой статьи делают акцент на холодном старте. При этом в центре внимания находится баланс между точностью рекомендаций и удовлетворенностью пользователей. Эксперимент также проводился на человеко-читаемых данных. В целом в качестве инновационности представлен именно LLM-компонент (состоящий из небольших агентов/модулей).

В рассмотренных источниках большое внимание уделяется большим языковым моделям, с архитектурой которых можно подробно ознакомиться в [13]. Также отметим, что создание интеллектуальных ассистентов в различных предметных областях активно рассматривается не только зарубежными авторами и исследователями, примеры которых в достаточном объеме приведены в данном разделе, но также и отечественными авторами и исследователями [14, 15]. Отличием системы, проектируемой в данном исследовании, является то, что перед проектируемой системой не ставится таких бизнес-целей как удержание аудитории или увеличение потребляемого контента, а преследуется цель уведомить пользователя о релевантных для его специфики и задач изменениях в информационной инфраструктуре компании. Например, выход нового дата-продукта, связанного с проектами пользователя, произошедшие изменения в актуальных

для него данных, выход релизов релевантных для пользователя систем, изменение метаданных, и др. Выделим две проблемы, которые были решены в [4] не до конца – слабая адаптивность моделей и недостаточная интерпретируемость результатов, и рассмотрим далее в этой статье способы решения в том числе этих задач.

2. Архитектура системы умной новостной ленты технособытий

Первичной информацией о событии являются технические данные, сгенерированные другими системами (журналы событий), которые трудно воспринимаются человеком. Перед нами стоит задача не только найти актуальное для пользователя событие, но и привести его к виду, который легко воспринимается человеком. Ввиду широкого спектра обрабатываемых событий, универсальным решением для приведения информации о событии к приемлемому для пользователя виду является внедрение большой языковой модели (LLM) для суммаризации технических данных в новостное уведомление, содержащее все ключевые аспекты о данном событии. Кроме того, для улучшения сопоставления пользователей с конкретным событием мы будем использовать выделение ключевых свойств с помощью тегирования.

Для определения контекста исследования введем в использование термин «техноданные»: это могут быть тысячи событий, происходящих в сотнях систем ИТ-ландшафта. В *таблице 1* приведен простой пример структуры таких событий.

Таблица 1.

Пример таблицы события

id	Date	Event's type	Description	...	Author	Source
uuid	Date	String	Text	...	Varchar	Varchar

Для решения задачи исследования была спроектирована интеллектуальная система для обработки большого объема событий, архитектура которой представлена на *рисунке 1*.

Рассмотрим основные элементы этой системы.

- ◆ События, генерируемые в системах ИТ-ландшафта, сохраняются в СУБД.
- ◆ Микросервис Giga-intgr отправляет данные технического события в LLM. Ответ от LLM (обработанные события) в виде сформированной новости и присвоенных тегов записывает в СУБД.

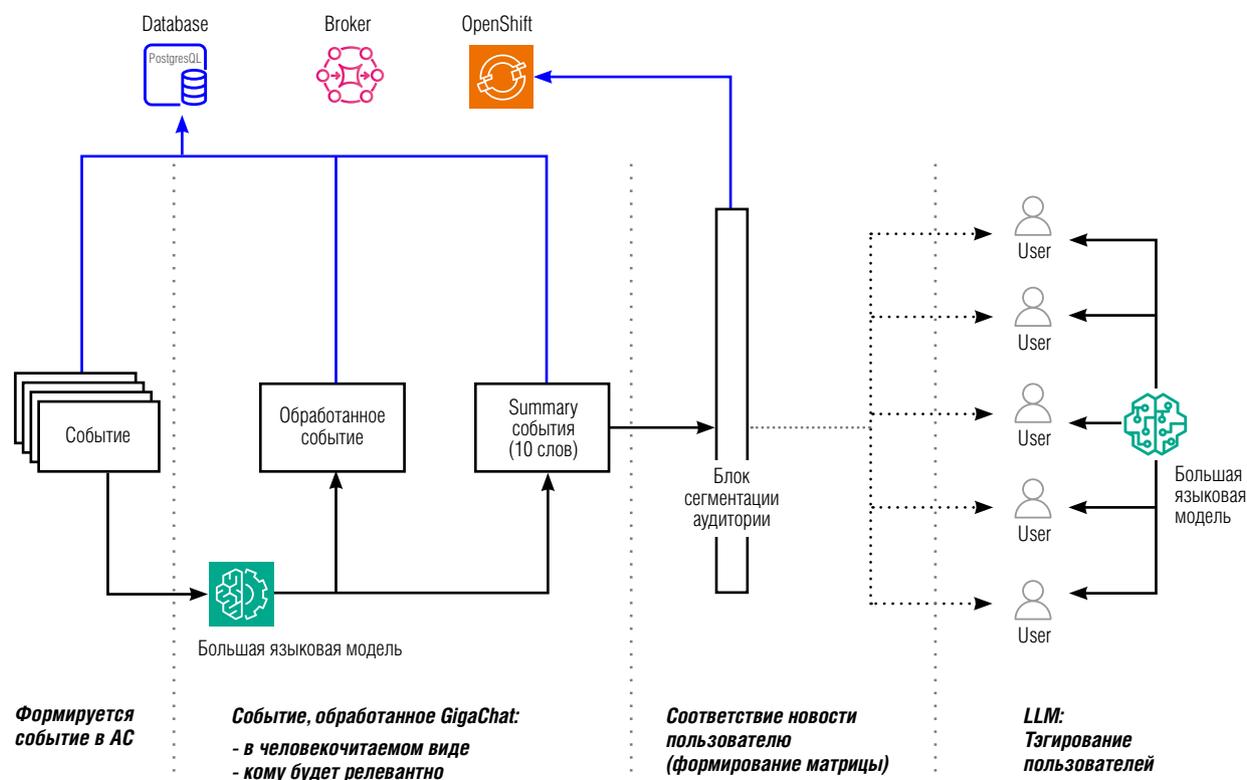


Рис. 1. Основные элементы интеллектуальной системы для обработки большого объема событий.

- ◆ Микросервис Jira-intgr запрашивает список задач пользователей в системе учета задач (Jira) и с помощью брокера сообщений передает в Giga-intgr. Giga-intgr передает полученное сообщение в LLM. Ответ от LLM (тегирование пользователей) в виде тегов для каждого пользователя записывает в СУБД.
- ◆ Сервис SegmentOfAuditory-serv формирует матрицу соответствия пользователя и новости с помощью модели.
- ◆ Сервис главной страницы получает новости для отображения в ленте из СУБД через API.

Общий итог применения LLM в представленной модели архитектуры заключается в способности решать следующие ключевые задачи:

- ◆ тегирование пользователей, то есть присвоение им соответствующих меток, отражающих их интересы и предпочтения;
- ◆ тегирование новостей, позволяющее классифицировать новостные материалы по различным категориям и тематикам;
- ◆ формирование краткого содержания новостей на основе технической информации, чтобы пользователь мог быстро ознакомиться с содержанием сообщения без необходимости читать весь текст;
- ◆ на рекомендательную систему приходится решение задачи подбора интересных новостей для каждого конкретного пользователя на основе его персональных интересов и предпочтений.

Представленная архитектура системы способна учитывать большое количество следующих параметров:

- ◆ большое количество информационных систем в качестве источников, которое может измеряться в диапазоне от одного до нескольких тысяч;
- ◆ большое количество событий с различной структурой, которая также может меняться как в зависимости от события или от системы-источника, так и со временем; количество событий может измеряться сотнями тысяч, и количество атрибутов в структуре этих событий может изменяться в диапазоне от двух до нескольких сотен;
- ◆ большое количество ролей пользователей и еще большее количество пользователей.

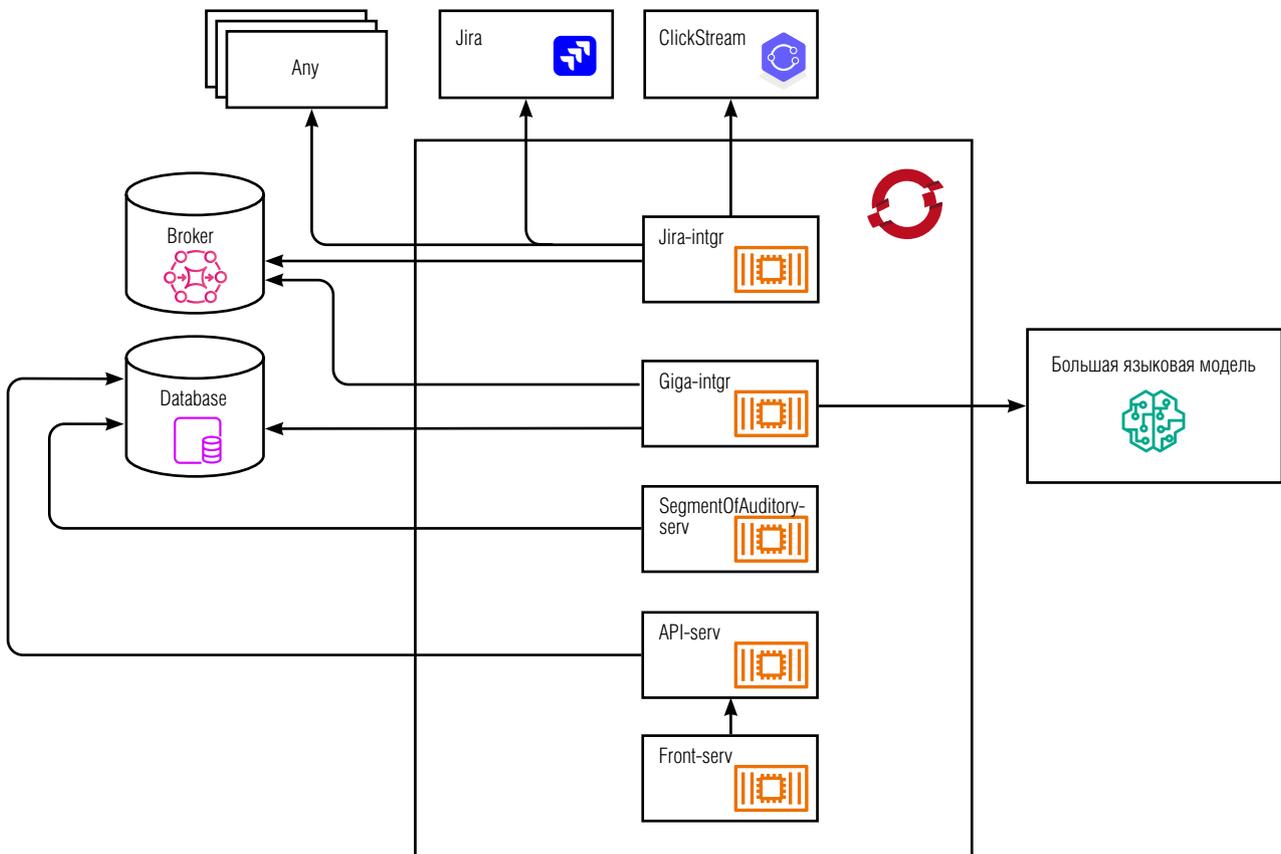


Рис. 2. Компонентная диаграмма.

Таблица 2.

Компоненты системы

Компонент	Описание
Большая языковая модель	В качестве средства доступа к большой языковой модели будет использована технология GigaChat API [16].
Any, Jira, ClickStream	Данные компоненты являются внешними системами – источниками данных. В качестве источника может выступать любая произвольная система.
СУБД	Компонент (stateful) для хранения данных в структурированном виде.
Брокер Kafka	Компонент (stateful) для реализации взаимодействия между микросервисами.
Giga-intgr	Компонент (микросервис) для реализации взаимодействия с большой языковой моделью. Реализован на Python.
Jira-intgr	Компонент (микросервис) для реализации получения данных из окружающего ИТ-ландшафта. Реализован на NodeJS.
SegmentOfAuditory-serv	Данный компонент (микросервис) служит для выбора, преобразования, комбинирования, и иных способов подготовки данных для поиска полезных закономерностей, а также для извлечения закономерностей из полученных данных.
API-serv	API для главной страницы ленты реализована на NodeJS.
Front-serv	Главная страница ленты (GUI) реализована на JavaScript – React.

Архитектура системы изображена на *рисунке 2*, а описание технических компонент приведено в *таблице 2*.

Архитектура спроектирована в микросервисном стиле и предполагает размещение в динамической инфраструктуре на кластере OpenShift в целях повышения уровня горизонтального масштабирования.

3. Оптимизация работы с техническими событиями

3.1. Постановка задачи рекомендации новостей

В целях сохранения связности изложения и для формализации задачи приведем описание метода матричной факторизации, который был неоднократно и подробно рассмотрен в [17–19], и представляет собой декомпозицию матрицы-источника на произведение двух других матриц меньшего ранга. В исследовании, которое описывается в данной работе, итоговая матрица R декомпозируется на матрицы A и B : рассматривается множество сотрудников $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, множество задач $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ и множество новостей $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$. Матрица задач сотрудника $A = (a_{ij}) \in \{0;1\}^{m \times n}$ определяется таким образом, что $a_{ij} = 1$, если сотрудник u_i занимается задачей t_j , и $a_{ij} = 0$ в противном случае. Матрица новостей $B = (b_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times k}$, представляет собой релевантность новости n_i к задаче t_j . Целью исследования является нахождение матрицы рекомендаций $R = (r_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times k}$, где r_{ij} – степень релевантности новости n_j для сотрудника u_i .

Оценка релевантности новостей для задач выполняется путем вычисления степени релевантности b_{ij} для каждой задачи t_j и новости n_i , используя методы текстового анализа BERT. Оценка релевантности новостей для сотрудника u_i осуществляется через вычисление степени релевантности r_{ij} для каждого сотрудника u_i и новости n_j , используя матрицу задач сотрудника A и матрицу новостей B . Ранжирование новостей для каждого сотрудника u_i производится по степени релевантности r_{ij} в порядке убывания.

Данный подход может быть представлен с помощью следующей формулы:

$$r_{ij} = \sum_{l=1}^n a_{il} \cdot b_{jl},$$

где a_{il} – степень участия сотрудника u_i в задаче t_l , а b_{jl} – степень релевантности новости n_j к задаче t_l .

Вводятся ограничения по задаче исследования:

ограничение на максимальное количество рекомендаций L для каждого сотрудника и установление минимальной степени релевантности r_{min} , ниже которой новость не рекомендуется пользователю.

Для оценки используемой модели используются следующие критерии: точность (Precision), полнота (Recall) и F1-score. Целью является максимизация этих метрик для обеспечения наиболее релевантных рекомендаций для каждого сотрудника. Комбинация критериев для оценки представлена в *таблице 3*.

Таблица 3.

Матрица критериев

Новость должна быть рекомендована и действительно попала в рекомендацию (TP)	Новость должна быть рекомендована, но в действительности не попадает в рекомендацию (FP)
Новость не должна быть рекомендована, но в действительности попадает в рекомендацию (FN)	Новость не должна быть рекомендована, и действительно не попадает в рекомендацию (TN)

Такая оценка позволит определить, насколько смело модель должна подбирать получателей. Первичная оценка сначала выполняется человеком.

Важно отметить, что при обучении модели в процессе исследования будет сделано допущение о доверительном интервале: если отсутствуют ошибки первого рода и существует допустимое количество ошибок второго рода, то та же картина сохранится на всем множестве (выборке). Ошибки должны быть агрегированы рецензентом и принято решение, требуется ли дообучение модели и коррекция промпта. Ошибки второго рода исправляются промптом, ошибки первого рода требуют дообучения.

Также необходимо учитывать необходимость решения задачи “холодного старта” [20], который возникает единоразово при запуске системы.

На представленном этапе исследования сделано допущение, что технические новости предлагаются пользователям случайным образом. Чтобы оценить качество предсказаний, было выполнено разделение множества оценок V на отдельные множества V_{train} для обучения и V_{test} для тестирования. Проведение тестов для модели будет выполнено на количественных показателях, которые представлены в *таблице 4*.

Таблица 4.

Количественные характеристики эксперимента

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Количество событий «Создание ДП»	40000	Обучающая выборка	75%
Количество событий «Изменение МД»	10000	Тестовая выборка	25%
Количество релизов АС КД	10–1500, включая дочерние задачи	Ранг матриц	будет принято значение X
Количество релизов АС СМД	10–1500, включая дочерние задачи	Шаги факторизации	будет принято значение Y
Количество пользователей	50	Диапазон значений исходной матрицы	{0, 1} – неявный фидбек

Характеристики, представленные в *таблице 4*, имеют отношение к специфике данной работы:

- ♦ ДП (дата-продукт) – вид информационного актива, представляющий собой структурированное описание набора промышленных данных (вид и состав данных, источники данных и способы поставки), доступных для заказа и получения через тракты распространения промышленных данных КАП с целью использования в интересах продуктов Банка и Экосистемы.
- ♦ КАП (корпоративная аналитическая платформа) – общее название решения, отвечающего за получение данных, их обработку и предоставление обработанных данных заинтересованным лицам. Централизованная платформа по сбору (загрузке), поставке (выгрузке), обработке, интеграции, исследованию и анализу данных. КАП состоит из Ядра и Пользовательского пространства (User space).
- ♦ МД (менеджер данных) – работник Банка, назначается на роль в соответствии с Политикой по управлению данными (в зависимости от объекта назначения).
- ♦ АС КД (автоматизированная система «Карта данных») – система, отвечающая за управление дата-продуктами: их атрибутами, структурой и признаком доступности к распространению в АС Супермаркет Данных.
- ♦ АС СМД (автоматизированная система «Супермаркет Данных») – единый портал взаимодействия с КАП, который позволяет изучить и заказать данные из КАП. Предназначена для распространения данных в КАП из реплик промышленных источников.

На начальной стадии эксперимента более 95% ячеек матрицы V будут не заполнены, т.е. матрица будет являться очень разреженной.

В качестве метрики будет использована среднеквадратичная ошибка ($RMSE$) [21]. $RMSE$ позволит оценить долю новостей, которые должны были быть показаны конкретной группе пользователей и были показаны:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2},$$

где M_i – прогнозируемое значение для i -го наблюдения в наборе данных;

O_i – наблюдаемое значение для i -го наблюдения в наборе данных;

N – размер выборки;

d – степени свободы в конфигурации модели. Для линейной подгонки $d = 2$.

3.2. LLM и промпт-инжиниринг

Для целей нашего исследования мы будем пользоваться уже обученной языковой моделью GigaChat [22], и сосредоточимся на промпт-инжиниринге для получения желаемого результата без дообучения модели. Значение этих терминов представлено в [23]: промпт-инжиниринг – это процесс создания эффективных и точных промптов для работы с большими языковыми моделями (LLM). Промпт (prompt – подсказка) – это текстовое описание задачи, которую необходимо выполнить с помощью ИИ-модели. Запрос, который задается модели для генерации текста, изображений, кода или других видов контента.

Для передачи в большую языковую модель будут использованы следующие элементы:

- ◆ промпт с типом «Обобщение» (Summarization) – выделение основных тезисов из текста, ключевые слова для данных типов промптов: сократи, суммаризуй;
- ◆ промпт с типом «Генерация» (Generation), ключевые слова: напиши, сочини, придумай;
- ◆ роль – для поведения в роли определенного персонажа;
- ◆ метод Zero-shot – не содержит примеров ответа, ответ большой языковой модели будет получен в свободной форме.

Предварительный список атрибутов журнала событий для передачи в большую языковую модель, на основании которой будет формироваться новость:

- ◆ ФБ трайба;
- ◆ трайб;
- ◆ название ДП;
- ◆ дата-продукт;
- ◆ категория;
- ◆ тип ДП;
- ◆ кластер;
- ◆ платформа схемы;
- ◆ схема БД;
- ◆ количество тэгов;
- ◆ имя тэга;
- ◆ таб. номер МД ДП;
- ◆ UUID;
- ◆ последний статус;
- ◆ дата назначения МД;
- ◆ флаг публикации;

- ◆ имя системы-приемника;
- ◆ площадка распространения;
- ◆ SLA и др.

Под трайбом здесь понимается группа кросс-функциональных команд, работающих над продуктовым или сервисным направлением. Каждая команда включает в себя специалистов всех необходимых профилей для создания продукта под ключ.

Таким образом, на основании атрибутов события «Изменение дата-продукта»:

- ◆ должна появиться новость: “*Витрина W для онлайн-помощника запущена в Блоке В1*”;
- ◆ новости должны быть присвоены тэги: {“Фокус-группа”: “Блок В1”}, {“Тема”: “Витрина W для онлайн-помощника”}, {“Категория”: “Новости Блока В1”}.

При подготовке промптов важно убедиться, что не возникнет эффекта галлюцинаций [16, 24]. Также обязательным пунктом при подготовке промпта является задача обязательного прохождения проверки Цензора. Возможны случаи, когда на корректный запрос к большой языковой модели Цензор расценивает его как нежелательный для обсуждения и возвращает ответ о неуместности данной темы с просьбой сменить ее на корректную.

По результатам первичного исследования были получены следующие результаты, представленные в *таблице 5*.

В *таблице 5* представлено сравнение расстояний между промптами и результатами генерации на их основе.

Таблица 5.

Результаты первичного исследования

Расстояние между промптами	Промпт 2	Промпт 3
Промпт 1	0,03732394628917002	0,095708435241878
Промпт 2	0	0,0855076122459778
Усредненное расстояние между новостями, сгенерированными при помощи этих промптов	AI-новость промпта 2	AI-новость промпта 3
AI-новость промпта 1	0,15939979460493073	0,1789409953210833
AI-новость промпта 2	0	0,13067957637939245

- ◆ Промпт 1: *«Сгенерируйте ясную и краткую новостную статью, суммирующую ключевые детали события, описанные в предоставленных технических данных. Фокусируйтесь на представлении фактуальной информации в человекочитаемом формате, избегая любых спекуляций, предположений или избыточных украшений. Убедитесь, что статья имеет четкую и логичную структуру, использует правильную грамматику и синтаксис предложений. Используйте нейтральный тон и избегайте сенсационного языка. Цель – предоставить информативный и объективный обзор события, делая его легко понятным для читателей».*
- ◆ Промпт 2: *«Сгенерируйте краткую и информативную новостную статью, резюмирующую ключевые детали события, описанного в предоставленных технических данных. Сосредоточьтесь на представлении фактической информации в нейтральном тоне, избегая любых спекуляций, предположений или эмоционального языка. Используйте четкую и логичную структуру и избегайте сенсационного или привлекающего внимание языка. Целью является предоставление объективного резюме события, чтобы читатели могли быстро понять, что произошло».*
- ◆ Промпт 3: *«Как эксперт в составлении информативных уведомлений составьте короткое сообщение длиной не больше 10–12 слов, которое сообщит ключевую информацию о событии».*

Из данных в *таблице 5* можно увидеть, что даже близкие по структуре и содержанию промпты могут давать результаты с существенным отклонением друг от друга. Такое поведение можно сравнить с поведением жесткой системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Исходя из того факта, что в проекте применяется уже обученная LLM без глобальной необходимости ее дообучения, а также на основании полученных результатов делается вывод о необходимости четкого формулирования промпта для получения стабильного результата.

Исходя из исследования поведения модели с различными промптами было отобрано три промпта, данные о которых были приведены в *таблице 5*. При помощи этих данных была сгенерирована тестовая выборка новостей, которая была предоставлена на разметку на платформе TagMe [25] целевой группе пользователей данного продукта, для выбора оптимального по информативности и

простоте восприятия варианта сформированных новостей. По итогу был выбран второй промпт для применения в пилотной версии продукта.

3.3. Холодный старт и первые результаты

Учитывая, что пользователями данного сервиса будут являться сотрудники нашей компании, целесообразно подумать о том, как можно «подогреть» холодный старт для новых пользователей, чтобы уменьшить воронку сходимости системы к рекомендации максимально релевантных новостей. Так как наша целевая аудитория существует в том же ИТ-ландшафте, возможно помимо сбора техноданных также собирать и цифровые следы работы пользователей. Первым и самым очевидным следом являются задачи, которые заводились на пользователя, и которые пользователь заводил сам. Исходя из этого мы можем сразу выдвинуть гипотезу о том, что задачи, которые связаны с пользователем, отражают род его профессиональной деятельности, и, следовательно, сравнивая новость по близости с задачами пользователя в Jira, мы можем предполагать, насколько они актуальны для пользователя. Получив задачи пользователя и построив эмбединги для задач, которыми занимался пользователь, и эмбединги для новостей и техноданных, мы можем построить матрицу близости (косинусных расстояний) между задачами и новостями. Так мы сможем получить первичную информацию о том, какие новости вероятнее всего будут пересекаться с профессиональной деятельностью пользователя.

После построения матрицы корреляций возникает задача отображения ее в ранжированный список новостей для рекомендации пользователю. Простейшим подходом будет расчет средней корреляции для каждой новости и сортировка по полученным значениям. Однако в ходе исследования был выбран другой способ, алгоритм которого выглядит следующим образом: для каждой новости выбирается топ N ($N = 5$) новостей для каждой задачи, каждой новости присваивается вес, равный $(N - i)$, где i – номер новости в топе для каждой из задач; далее все веса для каждой новости суммируются по полученным значениям и происходит сортировка. Особенностью такого подхода является то, что в конечное ранжирование попадают не все новости, однако распределение новостей происходит более «честным» способом

за счет того, что некоторые задачи плохо коррелируются как с релевантными для пользователя новостями, так и с другими задачами пользователя. Такое распределение позволяет, во-первых, снизить влияние выбросов и сделать ранжирование новостей более устойчивым к аномальным активностям пользователя, при этом сохранив релевантные для аномальных активностей новости, и, во-вторых, исключить из ранжируемой выборки нерелевантные новости, что в дальнейшем позволит более уверенно использовать на такой отфильтрованной выборке более сложные модели для выдачи новостей. Но в период холодного старта мы можем просто выводить K (количество новостей, рекомендуемых конкретному пользователю) первых новостей из этого списка.

Таким образом, когда пользователь в первый раз заходит в систему, система уже имеет первичные данные о специфике работы пользователя, основываясь на его задачах, полученных из системы учета задач. Система рассчитывает эмбединг по задачам пользователя, который в дальнейшем будет использован для поиска косинусного расстояния с эмбедингами новостей. Далее пользователю предлагается ознакомиться в ленте новостей с рекомендациями, которые для него рассчитала предлагаемая модель.

Преимуществом применения предложенной модели системы является исключение применения классических условных алгоритмов для определения целевых групп пользователей, в предложенной модели системы эту функцию будет выполнять рекомендательная система, используя алгоритм косинусного сходства и матрицы наложения. Способ обработки большого количества типов событий классическими методами с использованием условных операторов не дает желаемого результата. Тем временем использование языковой модели для категоризации событий и пользователей позволяет быстро и оптимально обработать такие типы событий. Также стоит учитывать, что один и тот же тип события, но с различными входными характеристиками, такими, как, например, объект логирования, в одном случае может быть актуален для конкретного пользователя, но в другом случае с другим объектом логирования уже будет не актуален. Обработка всех возможных комбинаций входных параметров с помощью условных операторов — это дорогая операция с технической точки зрения.

Заключение

В статье представлена концепция архитектуры системы управления событиями и модель маршрутизации событий в формате новостей конкретным пользователям, а также определены критерии оценки применения модели. Данный подход использует LLM для преобразования сырых технических данных в короткие новости, которые затем доставляются пользователям через систему рекомендаций. Подобное построение интеллектуальной системы комбинирует технологии нейронных сетей, рекомендательных систем и машинного обучения для минимизации эффекта спама и своевременного оповещения пользователей. Результатом автоматизации процесса генерации новостей будет являться сокращение времени, затрачиваемого экспертом на поиск информации, и как следствие минимизирован риск критических инцидентов. Предложенная архитектура программной системы реализует взаимодействие несвязанных компонентов, объединяя их в единый AI-агент, минимизируя поток новостей в адрес одного пользователя. Также предложенная архитектура позволяет обеспечить дальнейшее развитие системы с наименьшими затратами — интегрировать в систему компоненты распознавания речи, что будет делать систему полноценным AI-помощником. Комбинация этих технологий является незаменимым помощником для поддержки экспертов в их ежедневных задачах, связанных с данными.

По итогам первого применения предложенной модели к техническим данным, которые были накоплены исторически, был получен первый результат: обычно на таких данных решалась задача детекции инцидентов. Но в новых реалиях, когда скорость изменения ИТ-ландшафта регулярно растет, приходится искать новые способы применения LLM к техническим данным.

На примере модели системы, представленной в данной статье, было извлечено более 0,5% полезных данных из общего объема сообщений, и найдены более 1% релевантных потребителей этих данных. Данный результат так же позволяет сократить временные затраты сотрудников на отслеживание изменений ИТ ландшафта. В отличие от классических подходов решения задачи обнаружения аномалий по логам, представленным в [3] и [4], подход, предлагаемый в настоящей статье, акцентируется не на анализе логов, а на упрежде-

нии потенциальных инцидентов в связи с чувствительными изменениями в ИТ-ландшафте, в продуктах, потребляемых системами пользователя, за счет своевременного оповещения об этом пользователей. Верность выбранного нами направления также подтверждает гипотеза из [4], что высокий процент ложных срабатываний может привести к пропуску важных сбоев в системе, а высокий процент ложных пропусков может привести к напрасной трате усилий разработчиков. Предлагаемый нами подход позволяет предупредить сбои и затраты на усилия разработчиков.

Также была получена метрика конечного релевантного объема информации в размере 0,05–0,15% для тестовой выборки сотрудников и сокращение объема целевой информации с сохранением информативности до не более чем 10% от изна-

чального объема. Средний объем единицы поступающего материала с 8629 символов сократился до 189–538 символов, что более чем в 23 раза сократило объем потребляемой информации при сохранении 96% смысловой нагрузки. ■

Благодарности

Авторы выражают благодарность Управлению исследований и инноваций Сбера за проведение питч-сессии Техно-Идея и возможность проведения исследования, Управлению распространения данных и Управлению развития технологий искусственного интеллекта и машинного обучения Сбера за предоставление ресурсов на проведение исследования, а также доценту ФКН НИУ ВШЭ, кандидату педагогических наук Виденину С.А. за методические рекомендации при написании статьи.

Литература

1. Что такое агенты ИИ? // Microsoft. [Электронный ресурс]: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/cloud-adoption-framework/innovate/best-practices/conversational-ai> (дата обращения 20.07.2024).
2. Представлена платформа для запуска автономных AI-агентов // Сбер. [Электронный ресурс]: <https://ai.sber.ru/en/post/predstavlena-platforma-dlya-zapuska-avtonomnyh-ai-agentov> (дата обращения 20.07.2024).
3. Shah A., Pasha D., Zadeh E., Konur S. Automated log analysis and anomaly detection using machine learning // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. Vol. 358: Fuzzy Systems and Data Mining. 2022. P. 137–147. <https://doi.org/10.3233/FAIA220378>
4. Experience report: Deep learning-based system log analysis for anomaly detection / Z. Chen [et al.] // arXiv:2107.05908. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.05908>
5. Мокшанов М.В. Применение искусственного интеллекта в анализе данных: обзор текущего состояния и будущих направлений // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* 2024. № 5(122). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2024.122.5.17513>
6. Еремин О.Ю. Методы реализации гибридных рекомендательных систем // *E-Scio*. 2023. № 3(78).
7. Куренных А.Е., Судаков В.А. Подход к разработке гибридных рекомендательных систем // *Бюллетень науки и практики*. 2022. Т. 8. № 11.
8. Völske M., Potthast M., Syed S., Stein B. TL;DR: Mining reddit to learn automatic summarization // *Proceedings of the Workshop on New Frontiers in Summarization*, Copenhagen, Denmark, 2017. P. 59–63. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/W17-4508>
9. Pu H., Yang X., Li J., Guo R. AutoRepo: A general framework for multimodal LLM-based automated construction reporting // *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 255. Part B. Article 124601. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124601>
10. Sivakumar M., Belle A.B., Shan J., Shahandashti K.K. Prompting GPT-4 to support automatic safety case generation // *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 255. Part C. Article 124653. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124653>
11. Large Language Models meet Collaborative Filtering: An efficient all-round LLM-based recommender system / Sein Kim [et al.] // arXiv:2404.11343. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.11343>
12. RAH! RecSys-Assistant-Human: A human-centered recommendation framework with LLM agents / Y. Shu [et al.] // arXiv:2308.09904. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.09904>
13. Attention is all you need / A. Vaswani [et al.] // arXiv:1706.03762. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>

14. Морозевич Е.С., Коротких В.С., Кузнецова Е.А. Разработка модели формирования индивидуальных образовательных траекторий с использованием методов машинного обучения // Бизнес-информатика. 2022. Т. 16. № 2. С. 21–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.2.21.35>
15. Пальчунов Д.Е., Якобсон А.А. Разработка интеллектуального помощника для подбора товаров в процессе диалога с пользователем // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 1. С. 7–21. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.1.7.21>
16. Побочные эффекты галлюцинаций искусственного интеллекта / А.В. Аменицкий и [др.] // Наука, инновации, образование: актуальные вопросы и современные аспекты. С. 224–235. Пенза, 2024.
17. Strömqvist Z. Matrix factorization in recommender systems: How sensitive are matrix factorization models to sparsity? // Uppsala University Publications. 2018. [Электронный ресурс]: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1214390/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения 22.07.2024).
18. Мойсюк-Дранько П.А., Ревотюк М.П. Методы матричной факторизации для систем рекомендации // Информационные технологии и системы 2020 (ИТС 2020): материалы международной научной конференции. С. 193–194. Минск: БГУИР, 2020. [Электронный ресурс]: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/41339/1/Moysyuk_Dranko_Metody.pdf (дата обращения 22.07.2024).
19. Кузнецов И.А. Методы и алгоритмы машинного обучения для предобработки и классификации слабоструктурированных текстовых данных в научных рекомендательных системах. Дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО НИЯУ «МИФИ». Москва, 2019. [Электронный ресурс]: https://ds.mephi.ru/documents/90/Кузнецов_И_А_Текст_диссертации.pdf (дата обращения 22.07.2024).
20. Yuan M., Lin H.-T., Boyd-Graber J. Cold-start active learning through self-supervised language modeling // arXiv:2010.09535. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.09535>
21. RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics / M.W. Liemohn [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2021. Vol. 218. Article 105624. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105624>
22. GigaChat API // Сбер. [Электронный ресурс]: <https://developers.sber.ru/portal/products/gigachat-api> (дата обращения 20.07.2024).
23. Промпт-инжиниринг // Сбер. [Электронный ресурс]: <https://developers.sber.ru/docs/ru/gigachat/prompt-engineering> (дата обращения 26.12.2024).
24. Аменицкий А.В., Рухович И.В., Аменицкая Л.А., Аменицкий Д.А. Причины, этические проблемы и профилактика галлюцинации LLM // Интеллект. Сборник статей Международного конкурса молодых ученых. Пенза, 2024. С. 12–15.
25. Платформа разметки данных TagMe // Сбер. [Электронный ресурс]: <https://developers.sber.ru/portal/products/tagme> (дата обращения 09.12.2024).

Об авторах

Пашигорев Кирилл Игоревич

руководитель направления, Департамент управления данными, ПАО Сбербанк, Россия, 117105, г. Москва, Варшавское шоссе, 25А стр. 6;

E-mail: kipashigorev@sberbank.ru

ORCID: 0009-0008-3478-4874

Резников Андрей Олегович

главный инженер по разработке, Департамент управления данными, ПАО Сбербанк, Россия, 117105, г. Москва, Варшавское шоссе, 25А стр. 6;

E-mail: aoreznikov@sberbank.ru

Recommendation system model based on technical events

Kirill I. Pashigorev

E-mail: kipashigorev@sberbank.ru

Andrei O. Reznikov

E-mail: aoreznikov@sberbank.ru

PJSC Sberbank, Moscow, Russia

Abstract

Recommendation systems are widely used in the commercial field. The algorithms and architectures of recommendation systems are similar in various fields of application and have proven their effectiveness. Recommendations are based on the user's profile, the manner of his behavior on various IT (Information Technology) resources, as well as on similar users. At the same time, the use of recommendation systems in specialized areas is not widespread. Technology divisions are a promising new area of application for recommendation systems, and IT experts themselves will be the users. The purpose of this article is to consider a combination of a recommendation system, machine learning (ML) and LLM (Large Language Model) and to design these tools in a single system. Data volumes are currently measured in petabytes (10^{15} bytes) and exabytes (10^{18} bytes). In order to process even technical information (metadata/technodata) from the surrounding IT landscape, from the IT systems used by experts, AI (Artificial Intelligence) agents are needed. This article provides a literature review regarding the use of recommendation systems in combination with LLM applications, and suggests an application architecture model that generates human-readable news from technical event logs. The system is designed for a group of users who work with big data (ML engineers, data analysts, and data researchers). It is a combination of recommendation system technologies, LLM, and machine learning models. The article also provides the first results of the research that was carried out.

Keywords: recommendation system, matrix factorization, prompt engineering, LLM, AI agents

Citation: Pashigorev K.I., Reznikov A.O. (2025) Recommendation system model based on technical events. *Business Informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 7–21. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.7.21

References

1. Microsoft (2024) *What are AI agents?* Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/cloud-adoption-framework/innovate/best-practices/conversational-ai> (accessed 20 July 2024).
2. Sber (2024) *A platform for launching autonomous AI agents is presented.* Available at: <https://ai.sber.ru/en/post/predstavlena-platforma-dlya-zapuska-avtonomnyh-ai-agentov> (accessed 20 July 2024).
3. Shah A., Pasha D., Zadeh E., Konur S. (2022) Automated log analysis and anomaly detection using machine learning. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 358: Fuzzy Systems and Data Mining, pp. 137–147. <https://doi.org/10.3233/FAIA220378>
4. Chen Z., Liu J., Gu W., et al. (2021) Experience report: Deep learning-based system log analysis for anomaly detection. *arXiv:2107.05908*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.05908>
5. Mokshanov M.V. (2024) The use of artificial intelligence in data analysis: an overview of the current state and future directions. *Universum: technical sciences: electronic scientific journal*, no. 5(122) (in Russian). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2024.122.5.17513>

6. Eremin O.Y. (2023) Methods of implementation of hybrid recommendation systems. *E-Scio*, no. 3(78) (in Russian).
7. Kurennykh A.E., Sudakov V.A. (2022) Approach to the development of hybrid recommendation systems. *Bulletin of Science and Practice*, vol. 8, no. 11 (in Russian).
8. Völske M., Potthast M., Syed S., Stein B. (2017) TL;DR: Mining Reddit to Learn Automatic Summarization. Proceedings of the *Workshop on New Frontiers in Summarization, Copenhagen, Denmark, 2017*, pp. 59–63. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/W17-4508>
9. Pu H., Yang X., Li J., Guo R. (2024) AutoRepo: A general framework for multimodal LLM-based automated construction reporting. *Expert Systems with Applications*, vol. 255, part B, article 124601. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124601>
10. Sivakumar M., Belle A.B., Shan J., Shahandashti K.K. (2024) Prompting GPT–4 to support automatic safety case generation. *Expert Systems with Applications*, vol. 255, part C, article 124653. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124653>
11. Kim S., Kang H., Choi S., et al. (2024) Large Language Models meet Collaborative Filtering: An efficient all-round LLM-based recommender system. *arXiv:2404.11343*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.11343>
12. Shu Y., Zhang H., Gu H., et al. (2023) RAH! RecSys-Assistant-Human: A human-centered recommendation framework with LLM agents. *arXiv:2308.09904*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.09904>
13. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. (2017) Attention is all you need. *arXiv:1706.03762*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
14. Morozevich E.S., Korotkov V.S., Kuznetsova E.A. (2022) Development of a model for the formation of individual educational trajectories using machine learning methods. *Business Informatics*, vol. 16, no. 2, pp. 21–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.2.21.35>
15. Palchunov D.E., Yakobson A.A. (2024) Development of an intelligent assistant for the selection of goods in the process of dialogue with the user. *Business Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 7–21. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.1.7.21>
16. Amenitsky A.V., Rukhovich I.V., Amenitskaya L.A., et al. (2024) Side effects of hallucinations of artificial intelligence. *Science, innovation, education: current issues and modern aspects*, pp. 224–235. Penza, 2024 (in Russian).
17. Strömquist Z. (2018) *Matrix factorization in recommender systems: How sensitive are matrix factorization models to sparsity?* Uppsala University Publications. Available at: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1214390/FULLTEXT01.pdf> (accessed 22 July 2024).
18. Moisyuk-Dranko P.A., Revotyuk M.P. (2020) Methods of matrix factorization for recommendation systems. Proceedings of the international scientific conference *Information technologies and systems 2020 (ITS 2020)*, pp. 193–194. Minsk: BGUIR (in Russian). Available at: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/41339/1/Moisyuk_Dranko_Metody.pdf (accessed 22 July 2024).
19. Kuznetsov I.A. (2019) *Methods and algorithms of machine learning for preprocessing and classification of weakly structured text data in scientific recommendation systems*. Moscow: MEFHI (in Russian). Available at: https://ds.mephi.ru/documents/90/Кузнецов_И_А_Текст_диссертации.pdf (accessed 22 July 2024).
20. Yuan M., Lin H.-T., Boyd-Graber J. (2020) Cold-start active learning through self-supervised language modeling. *arXiv:2010.09535*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.09535>
21. Liemohn M.W., Shane A.D., Azari A.R., et al. (2021) RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 218, article 105624. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105624>
22. Sber (2024) *GigaChat API* (in Russian). Available at: <https://developers.sber.ru/portal/products/gigachat-api> (accessed 22 July 2024).
23. Sber (2024) *Prompt engineering* (in Russian). Available at: <https://developers.sber.ru/docs/ru/gigachat/prompt-engineering> (accessed 26 December 2024).
24. Amenitsky A.V., Rukhovich I.V., Amenitskaya L.A., Amenitsky D.A. (2024) Causes, ethical problems and prevention of hallucination LLM. *Intelligence. Collection of articles of the International Competition of Young Scientists*. Penza, pp. 12–15 (in Russian).
25. Sber (2024) *TagMe Data Markup Platform* (in Russian). Available at: <https://developers.sber.ru/portal/products/tagme> (accessed 09 December 2024).

About the authors

Kirill I. Pashigorev

Head of the Department, SberData, PJSC Sberbank, 25A bld. 6, Warsaw Highway, Moscow 117105, Russia;

E-mail: kipashigorev@sberbank.ru

ORCID: 0009-0008-3478-4874

Andrei O. Reznikov

Chief Development Engineer, SberData, PJSC Sberbank, 25A bld. 6, Warsaw Highway, Moscow 117105, Russia;

E-mail: aoreznikov@sberbank.ru

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.22.33

Определение последовательности реализации проектов программы повышения эффективности бизнес-процессов

А.И. Марон^a 

E-mail: amaron@hse.ru

Г.Д. Файнбург^{b*} 

E-mail: fain2000@mail.ru

^a Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

^b Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация

Статья посвящена проблеме определения последовательности реализации проектов в программе совершенствования бизнес-процессов организации. Актуальность исследования обусловлена тем, что в современных условиях наличие совершенных бизнес-процессов является условием даже не успеха, а выживания организации. Совершенствование бизнес-процессов – высокочрезвычайно затратная программа, включающая определенные проекты. Проекты программы не могут быть начаты одновременно из-за ограниченности бюджета и трудовых ресурсов. Возникает задача определения последовательности этапов реализации программы. Ее решение является одним из важнейших направлений бизнес-информатики. В работе предложен новый критерий для определения приоритетов проектов. В нем учтен тот факт, что средства для проектов генерируются при выполнении бизнес-процессов. В критерии также учитываются скорость освоения бюджета проекта и его потребность в участии ключевых сотрудников организации. Реализация программы разбита на этапы. На каждом этапе решается задача определения набора проектов, сумма приоритетов которых максимальна, а требования к ресурсам не превосходят ограничений, сложившихся к этому этапу. Актуальность статьи объясняется потребностью предприятий, обеспечивающих летную годность самолетов гражданской авиации. Работа представляет интерес для руководителей программ проектов производственных и сервисных компаний, а также для широкого круга научных работников.

* Автор, ответственный за переписку

Ключевые слова: бизнес-процесс, программа, проект, приоритет, критерий, последовательность реализации проектов

Цитирование: Марон А.И., Файнбург Г.Д. Определение последовательности реализации проектов программы повышения эффективности бизнес-процессов // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 1. С. 22–33. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.22.33

Введение

Бизнес-процессы (БП) являются фундаментом архитектуры предприятия. На их основе должны строиться организационная и ИТ структуры [1]. БП необходимо совершенствовать. Причем, в современных условиях период неизменности БП уменьшается.

Можно выделить два подхода к совершенствованию БП – повышение эффективности (оптимизация) и реинжиниринг. В первом случае улучшаются отдельные элементы БП [2]. На основе качественного и математического анализа создаются модели «как есть» (AS-IS) и «как должно быть» (TO-BE) [3–5]. Реинжиниринг предполагает создание модели TO-BE без оглядки на текущее состояние [6–8]. Нотации моделирования БП – это развитие сетевого подхода к моделированию последовательностей работ, который ранее нашел широкое применение в управлении проектами. Они позволяют в явном виде указывать возможность различных сценариев реализации БП. В сетевой модели проекта этого нет. Все работы, указанные в плане проекта, должны быть выполнены. На этом основан метод критического пути [9]. Проект уникален по определению, а менеджер должен его спланировать без сценариев. Это явное противоречие, вызывающее трудности. Возможность создать и хранить несколько планов проблему не решает [10]. Метод GERT [11, 12] также не привел к удобному для практики результату. Проблема сценариев в проектном управлении остается открытой.

В данной статье будет рассматриваться программа оптимизации БП. Разработка методологии формирования такой программы и управления ею является актуальной проблемой для предприятий различных отраслей народного хозяйства России. В связи со сложившейся обстановкой данный вопрос особо актуален для предприятий, обеспечи-

вающих поддержание летной годности воздушных судов гражданской авиации [13]. Для каждого БП реализация перехода из AS-IS в TO-BE – это отдельный проект. Вместе эти проекты образуют программу, направленную на достижение одной цели: «Оптимизировать БП компании». Возникают следующие два основных вопроса.

- ♦ Какие проекты включить в программу?
- ♦ В какой последовательности их выполнять?

Эти вопросы связаны с финансовыми и ресурсными ограничениями. Даже, если решить, что оптимизации подлежат только основные БП, приносящие доход, то и тогда ресурсов может не хватать для одновременного запуска инициированных проектов. Необходимо определить приоритеты проектов. При этом необходимо учитывать значимость БП для предприятия. Так же необходимо учесть, что финансовые средства на реализацию проектов поступают из дохода, который приносят БП. Рассмотрим, решена ли эта задача на сегодняшний день.

Управление проектами является наиболее регламентированным разделом менеджмента [14]. Регламентированы требования к квалификации менеджеров проектов [15]. Их действия по управлению проектами также регламентированы [16–19]. В этих и более ранних стандартах по управлению проектами указано, что проекты должны соответствовать стратегическим целям организации. В соответствии с этим в работе [20] предложено определять приоритеты проектов по степени их соответствия стратегическим целям организации. Для чего предварительно надо определить приоритеты целей. Этот подход основан на методе анализа иерархий (АНР) Саати [21]. Исходными данными для определения приоритетов целей является матрица парных сравнений. Сравнение производится на качественном лингвистическом уровне. Каждому лингвистическому значению соответствует

определенное числовое значение. Это позволяет перевести матрицу парных сравнений в цифровую форму. Приоритеты целей рассчитываются как собственный вектор, соответствующий главному собственному значению полученной матрицы. Метод АНР не учитывает связи между целями. Вместе с тем эти связи явно отображаются на стратегической карте. Стратегическая карта является элементом концепции Сбалансированной системы показателей [22, 23]. Рекомендуется ее использование для обеспечения согласованности при заполнении матрицы парных сравнений.

Подход, предложенный Vargas [20], реализован в MS-Project Server [24]. Метод расчета вектора приоритетов разработчиками не указан. Вместе с тем, его простое приближенное вычисление, предложенное в [21], может привести к ошибкам в расчете приоритетов, влияющем на упорядочение целей. Следует придерживаться высокоточной процедуры определения главного собственного значения матрицы и соответствующего собственного вектора [25].

Позднее был предложен ряд модификаций метода, предложенного Vargas [20]. Так, в работе [26] предложено учитывать уровень рисков проектов при их сравнении. Риск является неотъемлемым элементом проекта. Это следует из уникальности проекта. Работы, посвященные рискам проектов, можно разбить на две группы. В первой их них предлагаются методы, позволяющие определить, а лучше предсказать, момент, когда отклонения по срокам и/или финансам станут необратимыми [27–29]. Вторая группа работ посвящена организации своевременного контроля правильности выполнения работ [30–32]. Оба направления называют диагностикой проектов [33]. В технической диагностике направление аналогичное первому из них относят к прогнозированию отказов [34]. Направление аналогичное второму – это выбор контрольных точек [35].

В предложенном Vargas подходе [20] не используются в явном виде числовые характеристики ни целей, ни проектов. В работе [36] предложено оценивать приоритет проекта по сумме взвешенных баллов. При расчете баллов используются «индикаторы оценки устойчивости проекта». Они разделены на группы: «Экономические индикаторы», «Экологические индикаторы», «Социальные индикаторы». К экономическим индикаторам отнесены, в частности, NPV (Net Present

Value, показатель чистой приведенной стоимости) и IRR (Internal Rate of Return, внутренняя норма доходности) проекта. В группу экологических индикаторов входят, в числе других, удельное потребление энергии в натуральном выражении и использование энергии из возобновляемых источников. К социальным индикаторам отнесены: создание новых рабочих мест, уровень расходов на охрану труда. Затем ищется портфель (набор) проектов, при котором сумма взвешенных баллов максимальна, а ограничения по выделенным ресурсам и количеству проектов выполняются. При этом используется симплекс-метод.

Подходы, изложенные в работах [20] и [36] можно считать основными при решении задачи формирования портфеля или программы проектов на основе их приоритетов. При этом, в работе [20] речь идет только об определении приоритетов проектов. В работе [36] не только предложен метод расчета приоритетов проектов, но и решена задача начального формирования портфеля. Начального в том смысле, что определено какие из инициированных проектов следует включить в проект, а какие нет в силу имеющихся ограничений.

В задаче, которой посвящена наша статья, постулируется, что все проекты совершенствования выбранных БП должны быть реализованы, пусть и за несколько этапов. Как на начальном (первом этапе), так и на последующих этапах средства (бюджет) для реализации проектов формируется из дохода, который генерируют БП. Этот факт необходимо учитывать в явном виде при определении приоритетов проектов. Такого в литературе на сегодняшний день нет.

Таким образом актуальными являются:

- ♦ разработка метода расчета приоритетов проектов, направленных на совершенствование БП организации, с учетом того, что бюджет проектов формируется из доходов БП;
- ♦ определение последовательности реализации проектов программы оптимизации БП с учетом имеющихся финансовых и ресурсных ограничений, при условии, что все проекты должны быть выполнены.

В качестве начального рассмотрим случай, когда нет взаимосвязей между проектами, которые выполняются для оптимизации БП. Такая ситуация достаточна характерна для предприятий, обеспечивающих поддержание летной годности воздушных судов гражданской авиации [13].

1. Постановка задачи

У компании имеется n БП, которые непосредственно генерируют доход. В настоящее время интенсивность генерации дохода БП с номером i ($i = 1, 2, \dots, n$) равна v_i денежных единиц в единицу времени. Для конкретности изложения будем считать, что речь идет о тысячах рублей в день. Для совершенствования этих БП выделен начальный бюджет в размере B^1 . Этот бюджет сформирован из дохода, который ранее принесли данные БП. Решено их усовершенствовать (оптимизировать). Для этого проведено моделирование БП. В результате установлено, что необходимо сделать для перехода каждого БП из состояния AS-IS в состояние TO-BE. Для каждого i -го БП рассчитано насколько увеличится интенсивность генерации дохода в результате перехода из AS-IS в TO-BE. Обозначим эту величину через d_i . Также будем считать, что речь идет о тысячах рублей в день.

Для каждого БП i инициирован проект P_i , реализация которого обеспечит требуемый переход в новое улучшенное состояние. Соответственно величину d_i можно рассматривать как показатель эффективности проекта P_i . Всего инициировано n проектов. Установлено, что зависимостей между проектами нет. Стоимость (бюджет) проекта P_i равна C_i . Плановое время его реализации равно T_i . В компании работают m ключевых специалистов. Каждый проект требует участия не менее, чем одного из них. Ключевые специалисты заняты в БП. Ключевой специалист j ($j = 1, 2, \dots, m$) может выделить лишь определенную долю s_j своего дневного рабочего времени для работы в проектах. Будем в дальнейшем называть s_j проектным ресурсом ключевого специалиста j или просто ресурсом. Ресурс можно определять как в долях, так и в процентах от общего рабочего времени специалиста. Известно, что проект i требует от ключевого специалиста j ресурса в количестве s_{ij} . При этом $s_{ij} \leq s_j$.

Решено, что все проекты должны быть реализованы. Если на первом этапе начального бюджета и/или ресурсов недостаточно для одновременного запуска всех n проектов, то оставшиеся проекты будут запущены по мере накопления дохода от указанных выше БП и освобождения ресурсов ключевых специалистов.

Требуется определить порядок запуска проектов.

2. Решение

2.1. Приоритеты проектов по совершенствованию БП

При разработке систем управления эффективностью требуется создание специальных показателей [37]. Как указано в работе [37], это связано с тем, что используемые в инвестиционном анализе показатели экономических выгод носят опосредованный и неявный характер. Синтезируем адекватное сформулированным условиям выражение для расчета приоритетов проектов. При этом будем исходить из следующего.

1. Чем выше эффективность проекта, тем выше его приоритет.
2. Если стоимость проекта высока, то его включение в портфель уменьшает шансы других проектов войти в этот портфель.
3. Из двух проектов одинаковой стоимости, при прочих равных, менее предпочтительным является тот, у которого выше интенсивность освоения бюджета.
4. При прочих равных, проект, требующий меньший суммарный ресурс ключевых сотрудников, является предпочтительным.

Построим выражение для расчета приоритета проекта как безразмерную величину. Числитель должен отразить положительные факторы. Знаменатель отрицательные. Следуя пункту 1, в числитель поставим эффективность проекта d_i . Рассмотрим, что должно быть в знаменателе. В соответствии с пунктами 2 и 3 в знаменателе должна находиться интенсивность освоения бюджета проекта

$$c_i = C_i / T_i. \quad (1)$$

В соответствии с пунктом 4 необходимо учесть и ресурсоемкость проектов. Ресурсоемкость проекта логично определить как сумму ресурсов ключевых специалистов, необходимых для его реализации

$$R_i = \sum_{j \in M_i} s_{ij}. \quad (2)$$

где M_i – множество номеров ключевых сотрудников, ресурсы которых необходимы проекту P_i .

Условимся характеризовать относительную ресурсоемкость проекта P_i отношением необходимого для его реализации суммарного объема ресурсов ключевых специалистов к общему объему ресур-

сов, который можно задействовать для реализации проектов

$$r_i = \frac{R_i}{\sum_{j=1}^n s_j}. \quad (3)$$

Определенная таким образом относительная ресурсоемкость проекта показывает, какую долю требует данный проект от общего объема ресурсов ключевых специалистов, выделенного на все n проектов. Можно выразить относительную ресурсоемкость и в процентах. Для этого достаточно умножить в формуле (3) правую часть на 100%.

Окончательно получим следующее выражение для приоритета проекта

$$w_i = \frac{d_i}{c_i r_i}. \quad (4)$$

Таким образом, если целью проекта является улучшение БП, то в качестве его приоритета предлагается принять отношение эффективности проекта к произведению скорости освоения проектом бюджета на его относительную ресурсоемкость. Напомним, что под эффективностью проекта понимается увеличение интенсивности генерации дохода БП, на улучшение которого направлен проект.

2.2. Определение очередности запуска проектов

Поскольку по условию бюджет меньше суммарной стоимости проектов, на первом этапе предлагается начать реализацию портфеля из $n_1 < n$ проектов, сумма приоритетов которых максимальна и при этом выполняются следующие ограничения: суммарная стоимость не превосходит выделенный бюджет, а суммарная ресурсоемкость этих проектов не превосходит проектный ресурс ни одного ключевого специалиста, в них задействованного.

Для решения этой задачи можно применить метод линейного программирования. Заметим, что при наличии зависимостей между проектами, задача уже не является задачей линейного программирования. Введем n двоичных переменных X_i . Значение каждого X_i равно 1, если проект i входит в портфель, и равно 0, в противном случае. Задача сводится к максимизации целевой функции

$$\sum_{i=1}^n w_i X_i \rightarrow \max \quad (5)$$

при одном бюджетном ограничении

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq B^1 \quad (6)$$

и m ограничениях загрузки ключевых специалистов

$$\sum_{i=1}^n s_{ij} X_i \leq s_j. \quad (7)$$

Это задача линейного программирования, которая решается симплекс-методом. В результате решения получим определенное множество проектов, которые подлежат запуску на первом этапе. Обозначим множество их номеров через N_1 . Их суммарная стоимость равна

$$C^1 = \sum_{i \in N_1} C_i. \quad (8)$$

Условимся считать возможным началом второго этапа реализации проектов момент, когда завершен хотя бы один проект. При этом условимся считать, что если один проект завершен, а до окончания другого проекта остается небольшой временной лаг, то начало этапа откладывается до завершения второго проекта. Величину лага определяет менеджер программы, исходя из условия, что лаг не должен превышать числа рабочих дней, установленного куратором программы.

Остаток от начального бюджета ко второму этапу составит

$$\Delta B^1 = B^1 - C^1. \quad (9)$$

Очевидно, что этого бюджета будет недостаточно. Руководство компании должно принять решение о выделении дополнительного бюджета. Дополнительный бюджет берется из средств, которые сгенерируют БП за время t_{12} от начала первого этапа до начала второго этапа.

Заметим, что средства берутся из дохода, который приносят изначально доходные БП. Поэтому, тот факт, что эффект от оптимизации возникает не сразу и не скачкообразно влияет только на объем выделяемых средств.

Уместно предположить, что этот бюджет будет пропорционален времени с определенным коэффициентом q_2

$$B_e^1 = q_2 t_{12}. \quad (10)$$

В результате получим, что бюджет второго этапа составит

$$B^2 = \Delta B^1 + B_e^1. \tag{11}$$

Рассуждая аналогично, можно записать, что бюджет этапа с номером k определяется по формуле

$$B^k = \Delta B^{k-1} + B_e^{k-1}. \tag{12}$$

Здесь

$$B_e^{k-1} = q_k t_{(k-1)k}, \tag{13}$$

где $t_{(k-1)k}$ – время от начала этапа $(k-1)$ до начала этапа k .

Определим какими будут ресурсные ограничения на втором этапе.

На первом этапе загрузка специалиста j равна суммарной потребности в его ресурсе по всем проектам, которые запущены на первом этапе

$$S_j^1 = \sum_{i \in N_1} s_{ij}. \tag{14}$$

Допустим, что второй этап начинается после завершения проекта с номером f из числа проектов первого этапа. Завершение этого проекта высвобождает у специалиста j ресурс s_{jf} . Соответственно, на втором этапе доступный ресурс этого специалиста будет равен

$$S_{2j} = s_j - S_j^1 + s_{jf}. \tag{15}$$

Если же второй этап начинается после завершения нескольких проектов, множество номеров которых N_{1F} , то доступный ресурс специалиста j будет равен

$$S_{2j} = s_j - S_j^1 + \sum_{i \in N_{1F}} s_{ij}. \tag{16}$$

Рассуждая аналогичным образом, получим следующее. Если на начало этапа k еще не завершены проекты, множество номеров которых N_k^* , а этап начинается по завершению проектов, множество номеров которых N_{kF} , то доступный ресурс специалиста j составит

$$S_{kj} = s_j - \sum_{i \in N_k^*} s_{ij} + \sum_{i \in N_{kF}} s_{ij}. \tag{17}$$

Задача определения проектов, которые не были начаты на предыдущих этапах и запуск которых будет осуществлен на этапе $k > 1$, сводится к задаче линейного программирования, аналогично тому, как это было сделано ранее для этапа 1. При этом суммирование в целевой функции долж-

но проводиться только по множеству номеров N^k тех проектов, которые не начаты на предыдущих $(k-1)$ этапах

$$\sum_{i \in N^k} w_i X_i \rightarrow \max. \tag{18}$$

Бюджетное ограничение для этапа k имеет вид

$$\sum_{i \in N^k} C_i \leq B^k, \tag{19}$$

где B^k – бюджет этапа k , определяемый по формуле (12).

На всех этапах количество ресурсных ограничений равно m . Для специалиста j на этапе k оно имеет вид

$$\sum_{i \in N^k} s_{ij} \leq S_{kj}, \tag{20}$$

где S_{kj} – ресурс специалиста j , доступный к началу этапа k , определяемый по формуле (17).

Заметим, что возможной является ситуация, когда попытка начать очередной этап по завершению одного или даже нескольких проектов может быть неосуществимой из-за недостаточности ресурсов. В этом случае необходимо ждать завершения следующих проектов. Применим полученные результаты для решения реальной задачи.

3. Пример

Стратегическая цель компании – «Оптимизировать основные БП». Определены 10 таких БП. Для достижения цели инициированы десять проектов. Пять ключевых специалистов должны быть задействованы в их реализации. Следуя принятому в компании стилю, будем говорить, что выделенный ресурс каждого специалиста составляет 100%. Соответственно, и ресурсоемкость проектов будем задавать в процентах, как это сделано в *таблице 1*.

Характеристики проектов, определяющие их приоритеты, приведены в *таблице 2*.

Начально выделенный бюджет $B^1 = 10\,000\,000$ рублей втрое меньше суммарной стоимости проектов, которые надо реализовать. Кроме того, суммарная потребность проектов в ресурсах превышает 100% для каждого из специалистов. Поэтому проекты будут запускаться поэтапно. Решено, что на каждый этап $k > 1$ к оставшемуся бюджету будет добавляться сумма пропорциональная длительно-

сти предыдущего этапа с постоянным коэффициентом $q = 100\,000$ рублей.

Поскольку все проекты направлены на достижение одной стратегической цели можно сказать, что они образуют программу проектов. Требуется определить порядок реализации этой программы.

Следуя предложенному подходу, определяем симплекс-методом проекты, которые следует запустить на первом этапе. Получим, что это проекты с номерами $N^1 = \{2; 4; 5; 7\}$. Их суммарная стоимость $C^1 = 9\,306\,000$ рублей. Переходим ко второму этапу. Его можно начать после завершения проекта 5. Однако, учитывая, что проект 2 должен завершиться лишь на один день позже, принимается решение начать второй этап после его завершения. Таким образом длительность $t_{12} = 74$ дня. Бюджет второго этапа составит в соответствии с формулой (11) $B^2 = (10\,000\,000 - 9\,306\,000) + 100\,000 \cdot 74 = 8\,094\,000$ рублей.

Определяем по формуле (17) ресурсы специалистов. Вновь осуществляем решение задачи линейного программирования с двоичными переменными, номера которых принадлежат множеству $N^2 = \{1; 3; 6; 8; 9; 10\}$. Получим, что на втором этапе следует запустить проект 1.

Для реализации программы потребуется шесть этапов, сведения о которых приведены в таблице 3.

Таблица 1.

**Потребность проектов
в ресурсах специалистов (%)**

Проекты	Специалисты				
	1	2	3	4	5
1	29	8	31	41	50
2	44	11	1	39	22
3	36	38	27	36	43
4	1	18	21	8	7
5	15	16	2	2	27
6	24	7	21	18	33
7	15	45	48	45	5
8	50	7	43	41	33
9	18	29	13	32	4
10	10	19	28	48	17

На рисунке 1 приведена дорожная карта, рассмотренной программы по оптимизации БП компании.

Характеристики проектов

Таблица 2.

Проекты	Относительная ресурсоемкость	Плановое время реализации (дней)	Стоимость (тыс. руб.)	Интенсивность освоения бюджета (тыс. руб./день)	Эффективность (тыс. руб./день)	Приоритет
	r_i	T_i	C_i	c_i	d_i	w_i
1	0,318	159	3 665	23	22,5	3,07
2	0,234	74	648	9	3,9	1,90
3	0,36	126	6 333	50	32,5	1,80
4	0,11	144	6 896	48	50	9,49
5	0,124	73	1 071	15	5,2	2,86
6	0,206	52	5 590	108	32,9	1,49
7	0,316	129	691	5	6,6	3,90
8	0,348	36	1 418	39	10,4	0,76
9	0,192	84	3 822	46	20,1	2,30
10	0,244	66	4 076	62	20,2	1,34

Таблица 3.

Этапы реализации программы

Этап	Бюджет (млн. руб)	Ресурсы специалистов (%)					Запускаемые проекты	Проекты, после завершения которых начинается этап	Длительность этапа (дней)
		1	2	3	4	5			
k	B^k	S_1^k	S_2^k	S_3^k	S_4^k	S_5^k	N_k	N_{kF}	$t_{(k-1)k}$
1	10	100	100	100	100	100	2; 4; 5; 7		74
2	8,094	84	37	31	47	88	1	2,5	55
3	9,929	70	74	48	51	43	6; 9	7	84
4	8,917	53	63	56	27	46	3	4; 6; 9	20
5	4,584	71	92	69	59	50	10	1	66
6	7,108	64	62	73	64	57	8	10	40

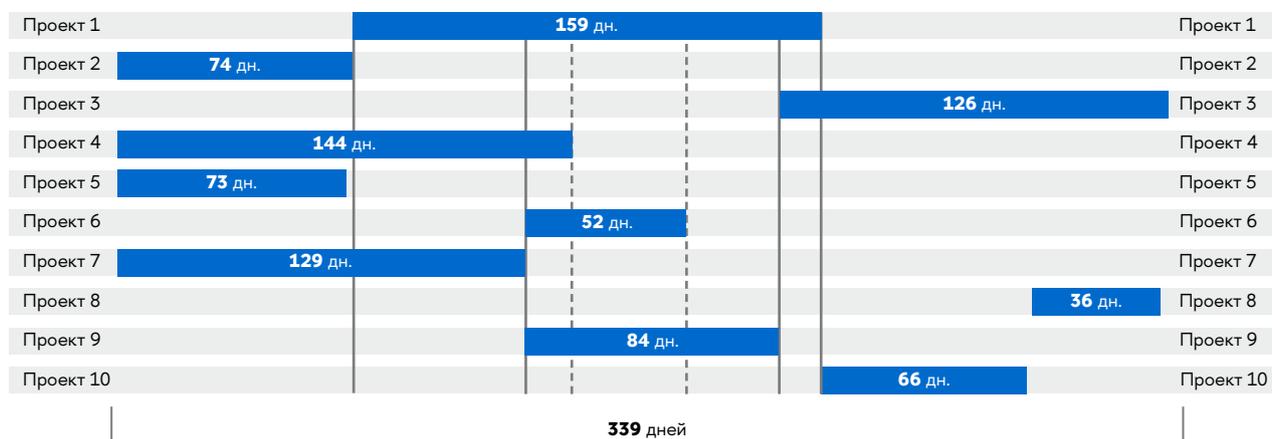


Рис. 1. Дорожная карта программы по оптимизации БП компании.

Заключение

По мнению авторов новыми в данной работе являются:

- ♦ выражение для расчета приоритета проектов, отражающее то, что проекты направлены на оптимизацию БП, которые генерируют бюджет для их реализации;
- ♦ метод поэтапного определения порядка реализации всей программы, направленной на оптимизацию БП, генерирующих доход компании.

Работа инициирована актуальной потребностью

предприятий, обеспечивающих летную годность самолетов гражданской авиации. Полученные результаты применимы и в других отраслях народного хозяйства.

Статья представляет интерес для руководителей программ проектов производственных и сервисных компаний, а также для широкого круга научных сотрудников и аспирантов технических и экономических специальностей. Развитием подхода является рассмотрение ситуации наличия зависимостей между проектами программы. ■

Литература

1. A guide to the business analysis body of knowledge (Babok Guide). Version 3.0. Toronto: International Institute of Business Analysis, 2015.
2. Громов А.И., Фляйшман А., Шмидт В. Управление бизнес-процессами. Современные методы. М: Юрайт, 2016.
3. Lapkin A., Piatkov V. Optimization of business processes based on system analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 451. P. 12–36.
4. Davis R. Business process modeling with ARIS. A practical guide. London: Springer, 2004.
5. Simulation in manufacturing and business: A review / M. Jahangirian [et al.] // European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 203. No. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.004>
6. Хаммер М., Чампи Дж. Реинжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе. СПб.: СПбГУ, 1997.
7. Черемных О.С., Черемных С.В. Стратегический корпоративный реинжиниринг: процессно-стоимостной подход к управлению бизнесом. М.: Финансы и статистика, 2005.
8. Ишмурадова И.И., Шагаипов Д.Р. Реинжиниринг бизнес-процессов на предприятиях по выпуску хлебобулочных изделий // Экономика, предпринимательство и право. 2016. № 1. С. 37–48.
9. Баркалов С., Воропаев В.И., Секлетова Г.И. Математические основы управления проектами. М.: Высшая школа, 2005.
10. Управление проектами с PRIMAVERA / В.В. Трофимов и [др.]. СПб.: Издательство СПбГУЭФ, 2006.
11. Pritsker A.A.V., Happ W.W. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part 1. Fundamentals // Journal of Industrial Engineering. 1966. Vol. 17. No. 5. P. 267–274.
12. Pritsker A.A.V., Whitehouse G.E. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part 2. Applications // Journal of Industrial Engineering. 1966. Vol. 17. No. 5. P. 293–301.
13. Ицкович А.А., Файнбург Г.Д., Файнбург И.А., Чернов А.О. Система процессов и проектов поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 1. С. 164–173.
14. Ципес Г.Л., Товб А.С. Проекты и управление проектами в современных компаниях. М.: Олимп-Бизнес, 2009.
15. A framework for performance-based competency standards for global level 1 and 2 project managers. Sydney: Global Alliance for Project Performance Standards, 2006.
16. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide) – 7th edition. Project Management Institute, 2021.
17. ГОСТ Р ИСО 21500-2014 Руководство по проектному менеджменту. М.: Стандартинформ, 2015.
18. The standard for portfolio management – Fourth edition. Project Management Institute, 2017.
19. Managing successful projects with PRINCE2 / Office of Government Commerce. London: The Stationery Office, 2009.
20. Vargas R.V. Using the analytic hierarchy process (AHP) to select and prioritize projects in a portfolio // PMI Global Congress. 2010. Vol. 32(3). P. 1–22.
21. Saaty T.L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. RWS Publications, 1990.
22. Kaplan R.S., Norton D.P. The balanced scorecard – measures that drive performance. Harvard Business Review, 1992.
23. Кузнецова Е.В. Управление портфелем проектов как инструмент реализации корпоративной стратегии: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2024.
25. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. СПб.: Лань, 2006.
26. Тихомирова А.Н., Сидоренко Е.В. Модификация метода анализа иерархий Т. Саати для расчета весов критериев при оценке инновационных проектов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2.
27. Williams T., Eden C., Ackermann F., Tait A. The effects of design changes and delays on project costs // Journal of the Operational Research Society. 1995. Vol. 46. No. 7. P. 809–818. <https://doi.org/10.1057/jors.1995.114>
28. Зуйков К.А. Устойчивость проекта. Подход, основанный на системной динамике // Управление проектами и программами. 2012. № 3(31). С. 178–187.
29. Кузьмин Е.А. Идентификация рисков в управлении проектами методом анализа балансов факторов и отклонений // Управление финансовыми рисками. 2012. № 3. С. 200–214.
30. Лесных В.В., Литвин Ю.В. Об оценке значимости выполнения работ проектов // Аудит и финансовый анализ. 2013. № 4. С. 254–260.
31. Maron M.A. The choice of control points of projects taking into account possible change of structure of works // Business Informatics. 2016. No. 2(36). P. 57–61. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2016.2.57.62>
32. Maron M.A. Diagnostics of projects // European Research Studies Journal. 2018. Vol. 21. No. 1. P. 18–30.
33. Джаафари А., Джабари Н. Диагностика проекта как средство ускорения его реализации // Управление проектами и программами. 2008. № 2. С. 128–139.
34. Itskovich A.A., Fainburg I.A., Fainburg G.D. Methodological aspects for controlling the processes that secure the reliability of aviation engineering // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48. No. 5. P. 446–455.
35. Дмитренко И.Е., Сапожников В.В., Дьяков Д.В. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. М.: Транспорт, 1994.

36. Аньшин В.М., Манайкина Е.С. Формирование портфеля проектов компании на основе принципов устойчивого развития // Вестник института экономики РАН. 2015. № 1. С. 126–140.
37. Исаев Д.В. Оценка программ развития систем управления эффективностью на основе модели зрелости // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 3. С. 5–18.

Об авторах

Марон Аркадий Исаакович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

доцент, департамент прикладной математики, Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 123458, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34;

E-mail: amaron@hse.ru

ORCID: 0000-0003-4443-3329

Файнбург Григорий Давидович

кандидат технических наук, доцент;

доцент, кафедра технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Россия, 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20;

E-mail: fain2000@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8004-1969

Determining the sequence of project implementation for the program of improving the efficiency of business processes

Arkadiy I. Maron^a

E-mail: amaron@hse.ru

Grigoriy D. Fainburg^{b*}

E-mail: fain2000@mail.ru

^a HSE University, Moscow, Russia

^b Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract

This article is devoted to the problem of determining the sequence of project implementation in a program of improving business processes of an organization. The relevance of the study is related to current conditions, where the quality of business processes is essential not just for the success, but also for

* Corresponding author

the survival of an organization. Improvement of business processes is a costly program that involves certain projects. The projects of the program cannot be started at the same time due to limited budget and human resources. Thus, we face the task of determining the sequence of stages of program implementations. The solution of this task is one of the most important problems of business informatics. This paper proposes a new criterion for prioritizing projects. It takes into account the fact that funds for projects are generated during the implementation of business processes. The criterion also takes into account the pace of spending the project budget and the need for participation of key employees of the organization. The implementation of the program is divided into a few stages. At each stage, the problem is solved by determining a set of projects whose sum of priorities is maximum and whose resource requirements do not exceed the constraints developed at that stage. The relevance of the article is initiated by looking at the need of enterprises that ensure the airworthiness of civil aviation airplanes. This work is of interest for project program managers of production and service companies, as well as for a wide range of researchers.

Keywords: business process, project, program, priority, criterion, sequence of projects implementation

Citation: Maron A.I., Fainburg G.D. (2025) Determining the sequence of project implementation for the program of improving the efficiency of business processes. *Business Informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 22–33. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.22.33

References

1. International Institute of Business Analysis (2015) *A guide to the business analysis body of knowledge (Babok Guide). Version 3.0.*
2. Gromov A.I., Fleishman A., Schmidt V. (2016) *Management business processes. Modern methods.* Moscow: Yurait (in Russian).
3. Lapkin A., Piatkov V. (2018) Optimization of business processes based on system analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 451, pp. 12–36.
4. Davis R. (2004) *Business process modeling with ARIS. A practical guide.* London: Springer.
5. Jahangirian M., Eldabi T., Naseer A., et al. (2010) Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research*, vol. 203, no. 1, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.004>
6. Hammer M., Champy J. (1997) *Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution.* St. Petersburg: St. Petersburg State University (in Russian).
7. Cheremnykh O.S., Cheremnykh S.V. (2005) *Strategic corporate reengineering: process-cost approach to business management.* Moscow: Finance and Statistics (in Russian).
8. Ishmuradova I.I., Shagaipov D.R. (2016) Reengineering of business processes at enterprises producing bakery products. *Economy, entrepreneurship and law*, no. 1, pp. 37–48 (in Russian).
9. Barkalov S., Voropaev V.I., Sekletova G.I. (2005) *Mathematical foundations of project management.* Moscow: Higher School (in Russian).
10. Trofimov V.V., et al. (2006) *Project management with PRIMAVERA.* St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics and Finance (in Russian).
11. Pritsker A.A.B., Happ W.W. (1966) GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part 1. Fundamentals. *Journal of Industrial Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 267–274.
12. Pritsker A.A.B., Whitehouse G.E. (1966) GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part 2. Applications. *Journal of Industrial Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 293–301.
13. Itskovich A.A., Fainburg G.D., Fainburg I.A., Chernov A.O. (2018) System of processes and projects for maintaining airworthiness of aircraft. *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation*, vol. 21, no. 1, pp. 164–173 (in Russian).
14. Tsipes G.L., Tovb A.S. (2009) *Projects and project management in modern companies.* Moscow: Olimp-Business (in Russian).
15. Global Alliance for Project Performance Standards (2006) *A framework for performance-based competency standards for global level 1 and 2 project managers.*
16. Project Management Institute (2021) *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide) – 7th edition.*
17. Standartinform (2015) *GOST R ISO 21500-2014 Guidelines for project management.* Moscow: Standartinform (in Russian).
18. Project Management Institute (2017) *The standard for portfolio management – Fourth edition.*

19. Office of Government Commerce (2009) *Managing successful projects with PRINCE2*. London: The Stationery Office.
20. Vargas R.V. (2010) Using the analytic hierarchy process (AHP) to select and prioritize projects in a portfolio. *PMI Global Congress*, vol. 32(3), pp. 1–22.
21. Saaty T.L. (1990) *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. RWS Publications.
22. Kaplan R.S., Norton D.P. (1992) *The balanced scorecard – measures that drive performance*. Harvard Business Review.
23. Kaplan R., Norton D. (2008) *Balanced Scorecard. From Strategy to Action*. Moscow: Olimp-Business (in Russian).
24. Kuznetsova E.V. (2024) *Project portfolio management as a tool for implementing corporate strategy: A textbook for universities*. Moscow: Yurait (in Russian).
25. Demidovich B.P., Maron I.A. (2006) *Fundamentals of computational mathematics*. St. Petersburg: Lan (in Russian).
26. Tikhomirova A.N., Sidorenko E.V. (2012) Modification of the method of analysis of hierarchies of T. Saaty for calculating the weights of criteria in the evaluation of innovative projects. *Modern Problems of Science and Education*, no. 2 (in Russian).
27. Williams T., Eden C., Ackermann F., Tait A. (1995) The effects of design changes and delays on project costs. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 46, no. 7, pp. 809–818. <https://doi.org/10.1057/jors.1995.114>
28. Zuikov K.A. (2012) Project sustainability. An approach based on system dynamics. *Project and program management*, no. 3(31), pp. 178–187 (in Russian).
29. Kuzmin E.A. (2012) Identification of risks in project management using the method of analyzing balances of factors and deviations. *Financial risk management*, no. 3, pp. 200–214 (in Russian).
30. Lesnykh V.V., Litvin Yu.V. (2013) On the assessment of the significance of the implementation of project work. *Audit and financial analysis*, no. 4, pp. 254–260 (in Russian).
31. Maron M.A. (2016) The choice of control points of projects taking into account possible change of structure of works. *Business Informatics*, no. 2(36), pp. 57–61. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2016.2.57.62>
32. Maron M.A. (2018) Diagnostics of projects. *European Research Studies Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 18–30.
33. Jaafari A., Jabari N. (2008) Project diagnostics as a means of accelerating its implementation. *Project and program management*, no. 2, pp. 128–139 (in Russian).
34. Itskovich A.A., Fainburg I.A., Fainburg G.D. (2019) Methodological aspects for controlling the processes that secure the reliability of aviation engineering. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 48, no. 5, pp. 446–455.
35. Dmitrenko I.E., Sapozhnikov V.V., Dyakov D.V. (1994) *Measurements and diagnostics in railway automation, telemechanic and communication systems*. Moscow: Transport (in Russian).
36. Anshin V.M., Manaykina E.S. (2015) Formation of a company's project portfolio based on the principles of sustainable development. *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, no. 1, pp. 126–140 (in Russian).
37. Isaev D.V. (2020) Evaluation of performance management systems development programs based on the maturity model. *Applied Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 5–18 (in Russian).

About the authors

Arkadiy I. Maron

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher;

Associate Professor, School of Applied Mathematics, HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM HSE), 34, Tallinskaya St., Moscow 123458, Russia;

E-mail: amaron@hse.ru

ORCID: 0000-0003-4443-3329

Grigoriy D. Fainburg

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

Associate Professor, Department of Technical Operation of Aircraft and Aircraft Engines, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 20, Kronstadtsky Blv., Moscow 125993, Russia;

E-mail: fain2000@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8004-1969

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.34.49

Моделирование и оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы «умного города» с использованием гибридных эволюционных алгоритмов

Е.А. Зарипов 

E-mail: e.a.zaripov@ya.ru

А.С. Акопов 

E-mail: akopovas@umail.ru

Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация

Современные города сталкиваются с растущей транспортной нагрузкой, что требует внедрения интеллектуальных систем управления дорожным движением. Одним из ключевых направлений является адаптивное светофорное регулирование, способное подстраиваться под изменяющиеся условия транспортного потока. Однако существующие методы оптимизации параметров светофорных циклов обладают рядом ограничений, таких как высокая вычислительная сложность, риск преждевременной сходимости алгоритмов и сложность учета динамики трафика. В данной работе предлагается подход к оптимизации характеристик интеллектуальной транспортной системы с использованием гибридных эволюционных алгоритмов. Разработанные методы комбинируют принципы генетических алгоритмов и алгоритма роя частиц, что позволяет достичь баланса между глобальным и локальным поиском оптимальных параметров. В исследовании рассматриваются шесть различных схем гибридизации, включая модифицированные версии базовых алгоритмов, а также их сочетание с методами кластеризации HDBSCAN для адаптивной настройки частоты оптимизации. Для проверки эффективности предложенных алгоритмов разработана имитационная

модель в среде AnyLogic, воспроизводящая условия реального городского трафика. Численные эксперименты, проведенные на локальном участке улично-дорожной сети г. Москвы, показали, что гибридный алгоритм SlipToBest демонстрирует наилучшие результаты по сокращению среднего времени проезда и снижению потерь топлива, а алгоритм Alternating (структурированное чередование ГА и PSO) обеспечивает высокую устойчивость решений. Результаты работы подтверждают целесообразность использования гибридных эволюционных методов в задачах управления транспортными потоками. Предложенные алгоритмы позволяют не только повысить эффективность светофорного регулирования, но и создать основу для дальнейшего развития адаптивных систем управления городским движением.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, управление транспортной инфраструктурой, умный город, гибридные эволюционные алгоритмы, имитационное моделирование, управление дорожным движением, AnyLogic

Цитирование: Зарипов Е.А., Акопов А.С. Моделирование и оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы «умного города» с использованием гибридных эволюционных алгоритмов // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 1. С. 34–49. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.34.49

Введение

В условиях растущей урбанизации адаптивное управление транспортными потоками становится необходимым инструментом для повышения эффективности дорожного движения. Одним из ключевых направлений в этом контексте является оптимизация светофорного регулирования, позволяющая динамически изменять фазы сигналов в зависимости от интенсивности трафика. Однако процесс выбора оптимальных параметров светофорных циклов представляет собой сложную оптимизационную задачу, связанную с высокой размерностью, нелинейностью и стохастическими изменениями транспортных потоков.

Традиционные аналитические методы и эвристические алгоритмы часто оказываются неэффективными при решении подобных задач из-за их неспособности адаптироваться к изменчивым условиям трафика и высокой вычислительной сложности. В связи с этим в последние годы все большее внимание уделяется эволюционным алгоритмам, таким как генетический алгоритм (ГА) и алгоритм роя частиц (particle swarm optimization, PSO). Эти методы позволяют находить приближенные оптимальные решения без необходимости расчета градиентов, что делает их особенно привлекательными для задач оптимизации в сложных системах.

Однако, несмотря на доказанную эффективность, оба подхода имеют свои ограничения. ГА обеспечивает хорошую диверсификацию решений, но часто сходится медленно. PSO, напротив, демонстрирует быструю сходимости, но склонен к преждевременному попаданию в локальные минимумы. Для преодоления этих недостатков активно разрабатываются гибридные методы, комбинирующие сильные стороны ГА и PSO. Гибридизация позволяет сбалансировать процессы глобального и локального поиска, что особенно важно для динамических систем, таких как управление светофорными циклами.

В данной работе предлагается усовершенствованный метод гибридной эволюционной оптимизации параметров светофорного регулирования. Рассматриваются различные схемы интеграции ГА и PSO, направленные на повышение точности и стабильности решений. Одним из ключевых элементов предложенного подхода является модификация роевого алгоритма — «SlipToBest», включающий направленный сдвиг частиц к лучшему найденному решению для ускорения процесса оптимизации. Также анализируется метод «Alternating», предполагающий чередование ГА и PSO с целью достижения баланса между глобальным и локальным поиском.

Дополнительно исследуется возможность применения алгоритма HDBSCAN для анализа плотности транспортных потоков и динамической корректировки частоты оптимизации. Это позволяет уменьшить вычислительные затраты и адаптировать алгоритмы к изменяющимся условиям дорожного движения.

Оценка эффективности разработанных методов проводится с использованием имитационной модели транспортных потоков, созданной в среде AnyLogic. Для экспериментов выбраны реальные данные по дорожной сети г. Москвы, что позволяет объективно оценить влияние предложенных алгоритмов на среднее время проезда и потери топлива.

Результаты работы показывают, что предложенные гибридные методы обеспечивают значительное улучшение по сравнению с классическими алгоритмами. SlipToBest демонстрирует лучшие показатели по скорости сходимости и снижению времени проезда, а Alternating обеспечивает стабильность решений даже при высокой изменчивости трафика. Включение метода кластеризации HDBSCAN позволяет дополнительно повысить адаптивность регулирования.

Таким образом, исследование подтверждает эффективность гибридных эволюционных алгоритмов для интеллектуального управления транспортными потоками и подчеркивает необходимость их дальнейшего совершенствования с целью повышения качества городской транспортной инфраструктуры.

1. Постановка оптимизационной задачи для интеллектуальной транспортной системы

Решение задач оптимизации параметров светофорного регулирования усложняется высокой размерностью, нелинейностью и стохастическим характером транспортных потоков, что подтверждается результатами исследований [1–5]. В таких условиях классические методы, включая градиентные алгоритмы и эвристики, зачастую требуют значительных упрощений моделей, что снижает точность найденных решений. В то же время эволюционные алгоритмы демонстрируют способность к глобальному поиску и адаптивности [4, 7, 9], что делает их предпочтительными для решения подобных задач. Наиболее широко применяемыми методами эволюционной оптимизации являются ГА, использующие механизмы селекции, скрещивания и мутации для поиска оптимального решения, а также алго-

ритм PSO, моделирующий коллективное поведение агентов в поисковом пространстве [3–6]. ГА эффективно исследуют пространство решений и обеспечивают высокую вариативность, но могут демонстрировать медленную сходимость. Напротив, PSO обладает высокой скоростью поиска, однако подвержен преждевременному попаданию в локальные минимумы [7, 10–12].

Для устранения этих недостатков в работе предлагается гибридизация ГА и PSO, позволяющая сочетать их сильные стороны. Рассматриваются несколько схем, включая **Alternating** (чередование этапов ГА и PSO), **SlipToBest** (дополнительный сдвиг к лучшему решению в PSO), **MixIntegrate** (интеграция генетических операторов в процесс роевого поиска) и **Mix** (простая комбинация без жесткой структуры). Как показано в ряде исследований, гибридные методы позволяют повысить эффективность поиска, улучшая как скорость сходимости, так и качество найденных решений [7, 10–12].

Оптимизация параметров управления светофорами в многоагентной транспортной системе формулируется как задача минимизации целевой функции, определяющей качество транспортного процесса.

Пусть $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор параметров, включающий длительности красных и зеленых фаз светофорных сигналов. Ограничения на параметры фаз задаются с учетом технических норм и регламентов, что определяет пространство поиска: $x_i \in [L_i, U_i]$, $i = 1, 2, \dots, n$, где L_i , U_i – нижнее и верхнее допустимые значения длительностей регулирующих сигналов всех светофоров, n – общее количество регулирующих сигналов.

При этом целевой функцией выступает среднее время проезда транспортных средств через исследуемый участок в течение заданного временного интервала моделирования. Обозначим эту величину как $f(x)$. Ее вычисление осуществляется с помощью имитационной модели в среде AnyLogic, которая на каждом наборе параметров воспроизводит движение автомобилей и фиксирует показатели времени проезда и потерь топлива. Среднее время проезда выступает интегральной характеристикой качества транспортного потока, поскольку оно отражает влияние интенсивности движения, пропускной способности перекрестков и логики светофорного регулирования [3–5].

Помимо среднего времени проезда, в анализе также учитываются дополнительные показате-

ли, такие как потери топлива и другие экономические и экологические факторы. Однако основная цель оптимизации заключается именно в минимизации времени проезда, поскольку оно является ключевым критерием эффективности работы светофорного регулирования. Эта формализация позволяет объективно оценивать влияние различных алгоритмов на транспортные процессы и корректно сравнивать их эффективность, поэтому постановка задачи представляется в следующем виде:

$$\min_{x_i \in X} f(x_i). \quad (1)$$

при ограничениях:

$$x_i \in [L_i, U_i], i = 1, 2, \dots, n.$$

Данная постановка широко применяется в исследованиях транспортных систем [1, 2], так как минимизация среднего времени проезда напрямую связана с повышением пропускной способности сети, снижением заторов и оптимизацией расхода топлива. Использование данной целевой функции обосновано фундаментальными работами по эволюционной адаптации [4] и исследованиями в области транспортной оптимизации [7, 9]. Доказано, что эволюционные алгоритмы, включая ГА и PSO, способны эффективно находить минимум такой функции, избегая необходимости в аналитических градиентах и позволяя моделировать сложные динамические процессы [3–6, 9]. Таким образом, минимизация функции служит основным критерием выбора оптимального набора параметров управления светофорами, обеспечивающего сокращение времени поездок и снижение транспортных затрат.

Задача (1), в частности, может быть решена с использованием **алгоритма PSO**, благодаря способности к эффективному поиску решений без необходимости в градиентной информации [3, 13]. Данный подход имитирует коллективное поведение частиц, которые обмениваются информацией о найденных улучшениях и стремятся к глобальному оптимуму.

Каждая частица в PSO обладает текущей позицией, скоростью изменения параметров, личной лучшей позицией и глобальной лучшей позицией. На каждой итерации частицы корректируют свою скорость и положение на основе полученной информации, используя процедуры обновления [5, 6, 13, 14]. Один из алгоритмов, применяемых в данном исследовании (**Swarm**), также реализован на основе данной классической схемы PSO. Данный алгоритм используется в качестве базового вариан-

та для сравнения эффективности гибридных модификаций. Выбор параметров PSO оказывает значительное влияние на эффективность алгоритма. Ши и Эберхарт [6] предложили стратегию динамического изменения веса инерции (переменная w) для балансировки между исследованием пространства решений и уточнением уже найденных решений. Клерк и Кеннеди [5] разработали концепцию ограничивающих коэффициентов, обеспечивающих стабильность сходимости. Современные исследования продолжают изучать оптимальные настройки параметров для различных классов задач, включая транспортную оптимизацию [1, 2, 9, 14, 15]. PSO является эффективным методом глобального поиска, демонстрирующим успешное применение в задачах транспортной оптимизации.

Также, задача (1) может быть решена с использованием **генетического оптимизационного алгоритма**, который представляет собой эволюционный метод оптимизации, основанный на механизмах отбора, скрещивания и мутации, имитирующих естественный процесс эволюции. Первоначально предложенный Холландом [4], ГА продемонстрировал эффективность в задачах оптимизации сложных многомерных пространств [7, 16–18]. В данной работе ГА используется для оптимизации параметров светофорного регулирования, где каждый индивид представляет собой вектор параметров $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, определяющих длительности фаз светофоров.

Начальная популяция генерируется случайным образом или с использованием эвристик, после чего итеративно выполняются процессы отбора, скрещивания и мутации для улучшения решений. Операция кроссинговера заключается в комбинировании параметров двух родительских индивидов для формирования потомка. Мутация представляет собой случайное изменение параметров индивидов, предотвращающее преждевременную сходимость алгоритма. Она играет важную роль в исследовании новых областей поискового пространства и улучшении качества решений. Генетический алгоритм обеспечивает глобальный поиск, позволяя эффективно исследовать сложные поисковые пространства. В данной работе рассматривается его классическая реализация (**Parallel**), в которой используются базовые механизмы кроссинговера и мутации. Этот алгоритм служит основой для дальнейших гибридных модификаций, комбинирующих ГА с PSO.

Третий, наиболее перспективный способ решения задачи (1) основан на **процедуре гибридизации PSO и ГА**. Подобная гибридизация позволяет объединить их сильные стороны: способность ГА к глобальному поиску и преодолению локальных минимумов, а также свойство PSO быстро уточнять найденные решения и двигаться к лучшим точкам пространства. Такое сочетание методов улучшает скорость сходимости и качество решений, особенно в сложных динамических системах, таких как транспортная инфраструктура [1, 2, 9, 10].

В данном исследовании рассматриваются четыре реализованных гибридных схемы, различающиеся по принципу смешения операторов и стратегии оптимизации.

- ♦ **Alternating (чередование ГА и PSO)** – предполагает поочередное применение ГА и PSO на разных итерациях алгоритма. Пусть задано число итераций ITERATIONS. На четных шагах используется ГА, а на нечетных – PSO (или наоборот, в зависимости от начальных условий):

$$\begin{aligned} \text{itermod}2 = 0 &\Rightarrow \text{применяем ГА,} \\ \text{itermod}2 = 1 &\Rightarrow \text{применяем PSO.} \end{aligned} \quad (2)$$

Подобные стратегии комбинирования упоминались в обзорах по гибридным методам [9, 19–21]. Чередование позволяет сохранить баланс между глобальным и локальным поиском: ГА периодически обновляет решения, увеличивая вариативность, а PSO оперативно улучшает кандидатов.

- ♦ **SlipToBest (PSO + alpha)** – предлагаемая модификация PSO, в которой после обновления позиций каждая частица дополнительно смещается к глобально лучшему решению на параметр α т.е. значение j -й искомой переменной i -й частицы может быть вычислено:

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + \alpha(g_j^{best}(t) - x_{i,j}(t)), \quad (3)$$

задающей сдвиг к лучшему решению. Данный метод позволяет ускорить сходимость, но может снизить диверсификацию решений при слишком высоких значениях параметра α [6, 11]. Здесь

$x_{i,j}$ – значение j -й искомой переменной i -ой частицы на шаге t ;

$g_j^{best}(t)$ – лучшее (глобальное) значение j -ой искомой переменной найденное всеми частицами роя к моменту t .

- ♦ **MixIntegrate (генетические операторы внутри PSO)** – предполагает внедрение генетических операторов (кроссинговера и мутации) непосредственно на этапе обновления роя. После выполнения стандартного шага PSO к выбранным парам частиц применяются генетические операторы:

$$x_{j,new} = \text{crossover}(x_{i,j}, \bar{x}_{\bar{i}j}), x'_{j,new} = \text{mutate}(x_{i,new}), \quad (4)$$

где

$\{x_{j,new}, x'_{j,new}\}$ – новые значения j -й искомой переменной, полученные в результате выполнения генетических операторов кроссовера и мутации;
 $\{x_{i,j}, \bar{x}_{\bar{i}j}\}$ – значения j -й искомой переменной i -й и \bar{i} -й частицами роя.

- ♦ **Применение генетических операторов в PSO.**

Такой подход позволяет сохранять разнообразие решений и предотвращать преждевременную сходимость роя. Подобные стратегии обсуждались в исследованиях по гибридной оптимизации [7, 9].

- ♦ **Mix (простая комбинация PSO и ГА)** – представляет собой менее структурированный вариант гибридизации, в котором PSO и ГА применяются без фиксированных правил или систематического использования операторов: применить PSO, затем ГА или наоборот, без фиксированного правила.

- ♦ **Простая схема Mix.** Такой подход упоминался в литературе как пример неструктурированной гибридизации, которая не всегда превосходит PSO или ГА в чистом виде [10, 12, 20].

Для оценки плотности дорожного потока в работе применяется **гибридный алгоритм кластеризации HDBSCAN** (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [21], представляющий собой иерархическое расширение метода DBSCAN. Этот алгоритм позволяет выявлять группы точек (кластеры) на основе их плотности и автоматически определять оптимальное количество кластеров, что делает его более гибким по сравнению с классическими методами, такими как k -means.

Преимущество HDBSCAN заключается в том, что он способен учитывать изменчивую структуру транспортных потоков, автоматически выделяя зоны высокой и низкой плотности движения. Это особенно

важно для анализа дорожного трафика, где интенсивность движения может существенно колебаться в зависимости от времени суток, дорожной инфраструктуры и непредвиденных факторов (ДТП, ремонтные работы и т.д.). Алгоритм также идентифицирует шумовые точки, которые могут соответствовать аномальным транспортным ситуациям, таким как заторы или резкие изменения трафика.

Для интеграции HDBSCAN с имитационной моделью AnyLogic разработана блок-схема работы алгоритма, представленная на *рисунке 1*. На каждом шаге моделирования (в момент времени t) выполняются следующие этапы:

1. Сбор и обработка данных о плотности транспортного потока, поступающих от «умного» светофора.

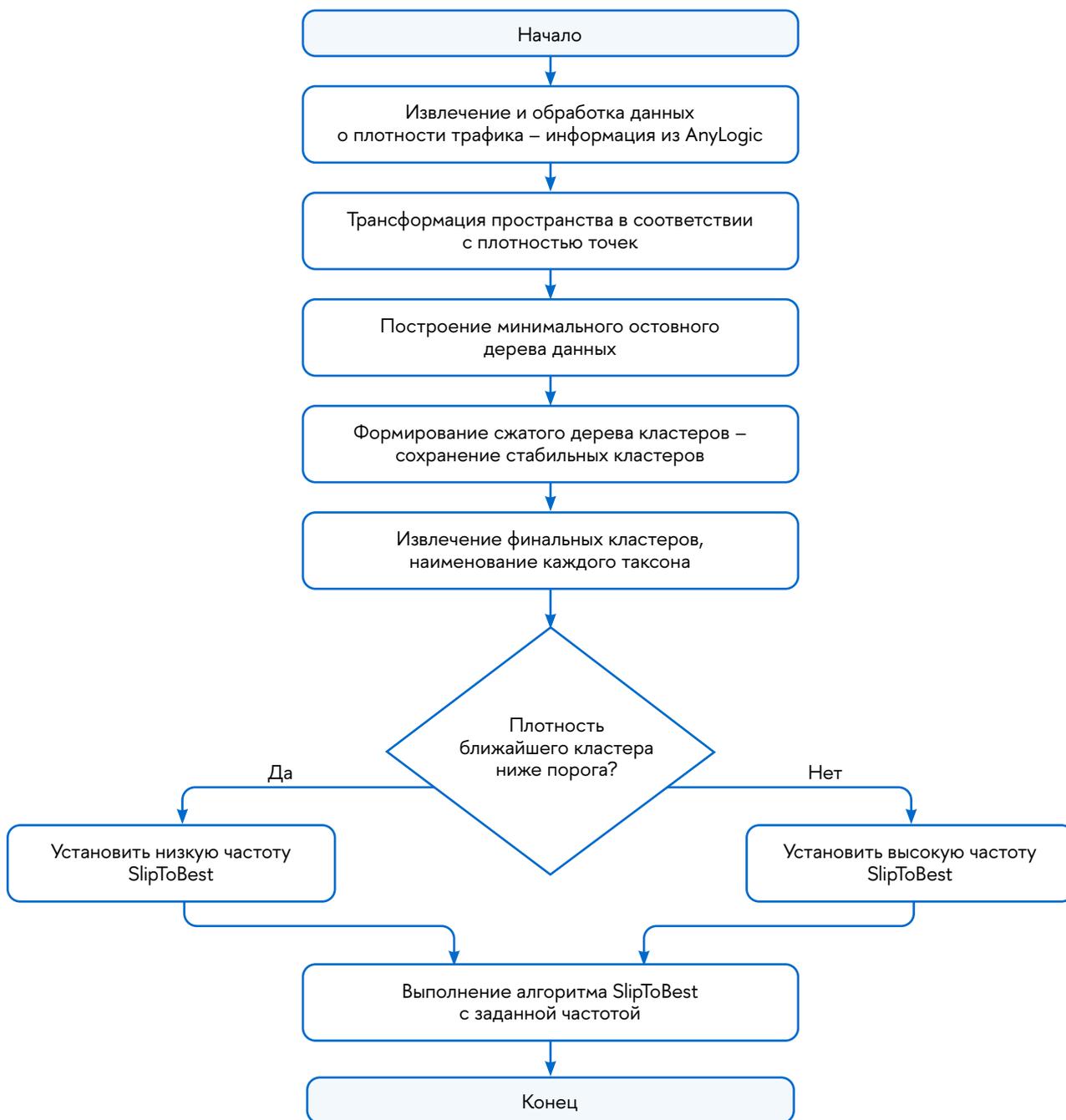


Рис. 1. Укрупненная блок-схема алгоритма HDBSCAN, агрегированного по данным с имитационной моделью AnyLogic.

2. Анализ пространственного распределения автомобилей в окрестности светофора с учетом их плотности.

3. Формирование минимального остовного дерева для иерархического представления кластеров.

4. Оценка устойчивости кластеров (анализ плотности, продолжительности существования кластеров).

5. Формирование «конденсированного дерева» для выявления стабильных кластеров.

6. Определение финальной структуры кластеров и присвоение соответствующих меток.

HDBSCAN позволяет адаптивно регулировать частоту запуска гибридного алгоритма SlipToBest:

- ◆ Если ближайший кластер к светофору имеет низкую плотность, система снижает частоту применения алгоритма SlipToBest (уменьшая нагрузку на вычислительные ресурсы).
- ◆ Если плотность кластера превышает пороговое значение, SlipToBest активируется чаще, обеспечивая оперативную реакцию на изменения трафика.

Таким образом, алгоритм HDBSCAN выполняет динамическую адаптацию управления светофорными фазами, позволяя эффективнее использовать ресурсы и точнее учитывать изменчивую дорожную ситуацию.

2. Реализация имитационной модели в AnyLogic

Для перечисленных гибридных алгоритмов параметры, такие как коэффициент λ , частота применения операторов ГА и количество итераций PSO между генетическими этапами, подбираются эмпирически или на основе рекомендаций из научных работ [6, 7, 9–12, 19–22]. Для объективного сравнения их эффективности в работе используется единая среда моделирования (AnyLogic) и общая целевая функция (см. (1)), что обеспечивает корректность анализа. Применение AnyLogic в задачах адаптивного управления транспортными потоками ранее показало свою эффективность [23].

Разработанная модель в AnyLogic расширяет возможности классических PSO и ГА, обеспечивая гибкий и эффективный поиск оптимальных параметров светофорного регулирования. В дальнейшем представлены результаты применения гибридных алгоритмов и сравнительный анализ их эффективности.

В ходе доработки имитационной модели были внесены улучшения, приближающие ее к реальным условиям транспортных потоков и обеспечивающие упрощенную интеграцию с внешними оптимизационными алгоритмами. Автомобили теперь перестраиваются между полосами с учетом приоритетности рядности, скорости соседних транспортных средств и расстояния до стоп-линий. Эти изменения повысили реалистичность моделирования, сделав поведение транспортных агентов максимально приближенным к городской среде.

Переменные и параметры модели, включая длительности красных и зеленых фаз светофоров, были структурированы таким образом, чтобы их можно было легко считывать, изменять и анализировать из внешнего кода. Это значительно упростило интеграцию с эволюционными алгоритмами и позволило выполнять массовые итерации для оценки качества управленческих решений.

Структура модели и ее программная реализация оптимизированы таким образом, чтобы добавление или удаление светофоров не требовало значительных изменений исходного кода. Это позволяет гибко адаптировать модель под различные сценарии, изменять топологию дорожной сети и корректировать зону оптимизации без значительных временных затрат.

Разработанная модель подготовлена для интеграции с внешним оптимизирующим кодом. Модульная архитектура позволяет использовать AnyLogic в режиме «черного ящика», при котором алгоритмы получают параметры светофоров, обрабатывают их, а затем возвращают оптимизированные значения, обеспечивающие минимальное среднее время проезда и снижение потерь топлива. Это делает процесс внедрения новых алгоритмов оптимизации удобным, а их сравнение — объективным.

На *рисунке 2* представлена структура обновленной модели участка улично-дорожной сети, созданной в AnyLogic. Данная модель включает размещение светофоров и параметры временных фаз, что позволяет гибко тестировать различные алгоритмы адаптивного управления.

Имитационная модель предоставляет возможность варьировать ключевые параметры светофорного регулирования, напрямую влияющие на пропускную способность и динамику движения. На *рисунке 3* продемонстрирована панель параметров типичного «умного» светофора (trafficLight4).



Рис. 2. Структура обновленного моделируемого участка улично-дорожной сети в среде AnyLogic с размещенными светофорами и параметрами временных фаз.

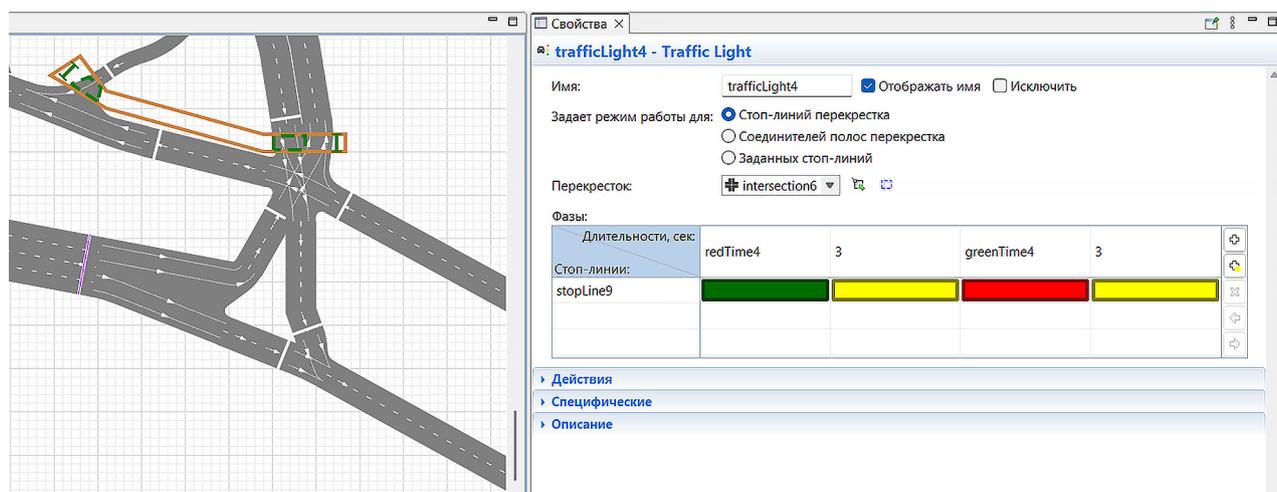


Рис. 3. Панель параметров «умного» светофора (trafficLight4) в AnyLogic с указанием длительностей фаз и прикрепленной стоп-линий.

В модели задаются длительности фаз (*redTime*, *greenTime*), привязка к стоп-линиям и режим работы светофора. В зависимости от интенсивности трафика и конфигурации перекрестка модель адаптирует логику переключения сигналов, определяя оптимальные интервалы зеленых и красных фаз.

Во время экспериментов алгоритм формирует управленческие решения, определяя оптималь-

ные длительности фаз *redTime*, и *greenTime*, для всех светофоров. Эти параметры загружаются в модель перед запуском симуляции. Далее AnyLogic воспроизводит поток автомобилей, фиксируя среднее время проезда и потери топлива. Таким образом, эволюционный алгоритм получает объективную оценку качества управления, анализируя влияние параметров на целевую функцию.

На последующих итерациях алгоритм обновляет параметры светофоров, минимизируя среднее время проезда. Модель автоматически адаптируется к изменению параметров, что позволяет динамически настраивать светофорное регулирование под различные транспортные условия, включая разреженный трафик и высокую загруженность сети.

3. Результаты численных экспериментов и анализ эффективности алгоритмов

Разработанная в ходе исследования имитационная модель транспортных потоков на локальном участке улично-дорожной сети в среде AnyLogic была ранее подробно описана в работах авторов [1, 2]. Модель учитывает особенности дорожной инфраструктуры, расположение светофоров и пешеходных переходов, а также опирается на агент-ориентированный и дискретно-событийный подход. Параметры моделирования, включая длительность симуляции, конфигурацию дорожной сети и интенсивность транспортных потоков, определены на основе реальных данных о трафике вблизи станции метро «Юго-Западная» в Москве [1].

В рамках экспериментов варьируемыми параметрами выступали длительности красных и зеленых фаз светофоров, поскольку именно эти характеристики оказывают ключевое влияние на пропускную способность дорожного участка. Каждая конфигурация фаз оценивалась по средней величине времени проезда транспортных средств, а также по показателям потерь топлива, вычисляемым на основе результатов симуляции.

Для каждого рассматриваемого алгоритма (Alternating, SlipToBest, Swarm, Parallel, MixIntegrate, Mix)

проводилась серия запусков, позволяющая снизить влияние случайных факторов и оценить устойчивость решений. В качестве критерия остановки чаще всего использовалось фиксированное количество итераций или поколений, определяемое ограничениями вычислительных ресурсов и наблюдательной практикой. Также учитывался порог отсутствия улучшений, при достижении которого алгоритм прекращал работу.

Анализируемые алгоритмы различаются по структуре и принципам сочетания методов PSO и ГА, что отражается на их эффективности. Для объективного сравнения были использованы следующие метрики:

- ♦ среднее время проезда, характеризующее пропускную способность дорожного участка и уровень удобства для водителей;
- ♦ потери топлива (AllLostGas), отражающие экономическую и экологическую эффективность управления, поскольку снижение неоправданных простоев транспортных средств ведет к уменьшению расхода топлива.

Результаты численных экспериментов обобщены в *таблице 1*, где представлены лучшие средние времена проезда, достигнутые каждым алгоритмом. На *рисунке 4* приведен график, визуализирующий эффективность рассмотренных подходов. Под «Потерянным топливом» понимается суммарный избыточный расход топлива (л) для заданной выборки автомобилей (например, 10 000 транспортных средств), участвовавших в серии симуляционных прогонов. Числовые значения усреднены с учетом стохастических флуктуаций в дорожном движении, связанных с различиями в режимах ускорения, торможения и плотностью трафика.

Таблица 1.

Сравнительные итоги по средней длительности проезда и потере топлива

Алгоритм	Характеристика подхода	Лучшее среднее время проезда, мин.	Потерянное топливо, л
SlipToBest	Рой с дополнительным сдвигом к лучшему решению (параметр)	3,2213	288,5
Alternating	Чередование ГА и PSO	3,2483	295,4
Swarm	Чистый алгоритм PSO	3,2246	296,2
Mix	Простая комбинация PSO и ГА, без четкого чередования	3,2650	308,7
MixIntegrate	Роевой алгоритм с операторами ГА (мутация, кроссинговер)	3,2798	312,9
Parallel	Чистый ГА	3,3009	318,5

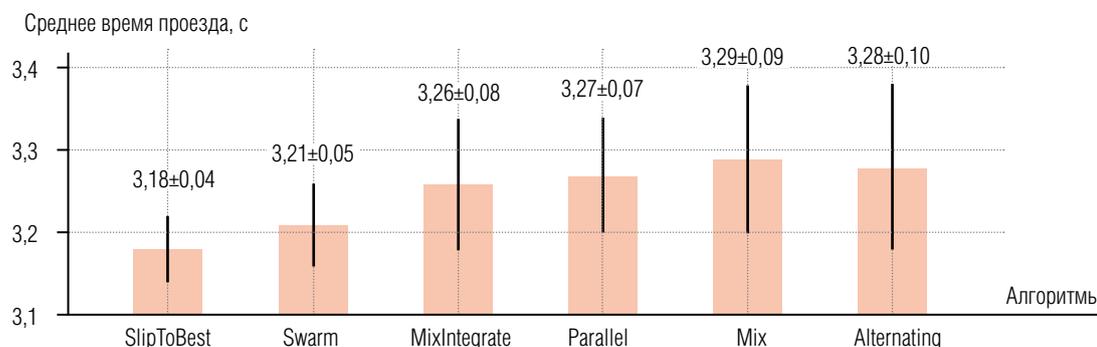


Рис. 4. Сравнение эффективности исследованных алгоритмов по среднему времени проезда.

Анализ данных из *таблицы 1* показывает, что SlipToBest демонстрирует наилучшие результаты, обеспечивая минимальное среднее время проезда при наименьшем расходе топлива. Следующими по эффективности выступают Alternating и Swarm. При этом Alternating, благодаря чередованию операторов ГА и PSO, превосходит как чистый PSO (Swarm), так и менее структурированные гибридные подходы (Mix, MixIntegrate). Использование чистого генетического алгоритма (Parallel) приводит к наибольшим затратам времени и топлива, что указывает на недостаточную эффективность метода без дополнительных модификаций.

Таким образом, целенаправленные усовершенствования ройного алгоритма (например, введение параметра α в SlipToBest) или рациональное чередование эволюционных операторов (как в Alternating) обеспечивают наибольший выигрыш по скорости проезда и снижению топливных затрат. В то же время неструктурированные схемы гибридизации (Mix, MixIntegrate) и чистый генетический алгоритм (Parallel) уступают более организованным и продуманным гибридным архитектурам, что подтверждает важность системного подхода при проектировании эволюционных алгоритмов.

Для более детального сравнения представлена оценка времени выполнения различных алгоритмов при управлении светофорными циклами на рассматриваемом участке дорожной сети. Результаты приведены в числовом формате, что позволяет сравнить вычислительную сложность методов и оценить их применимость для практических сценариев моделирования.

В ходе эксперимента анализировались шесть алгоритмов оптимизации:

- ♦ **SlipToBest** – модифицированный алгоритм роя частиц с параметром α .
- ♦ **Parallel** – чистый генетический алгоритм с параллельной обработкой данных.
- ♦ **Swarm** – стандартная реализация PSO.
- ♦ **MixIntegrate** – комбинированный метод, в котором PSO интегрируется с операторами ГА (мутация, кроссинговер).
- ♦ **Mix** – гибридный алгоритм, комбинирующий PSO и ГА без строгой схемы чередования операторов.
- ♦ **Alternating** – метод, в котором чередуются этапы PSO и ГА для балансировки глобального и локального поиска.

Основная цель анализа заключалась в определении времени выполнения каждого алгоритма при фиксированных входных параметрах в среде AnyLogic.

На *рисунке 5* представлены результаты экспериментов, иллюстрирующие время выполнения алгоритмов в секундах на основе численных симуляций.

Анализ полученных данных показывает, что SlipToBest обладает наименьшим временем выполнения – 1992,78 секунд, что свидетельствует о высокой вычислительной эффективности алгоритма. Оптимизация параметра α позволила ускорить сходимость и уменьшить общее время расчетов. Parallel продемонстрировал 2415,93 секунды благодаря параллельной обработке данных, что позволило значительно ускорить вычисления по сравнению с последовательными методами. Swarm (классический PSO) показал 3008,97 секунд, что подтверждает его устойчивую, но не самую быструю сходимость по сравнению с модифицированным SlipToBest.

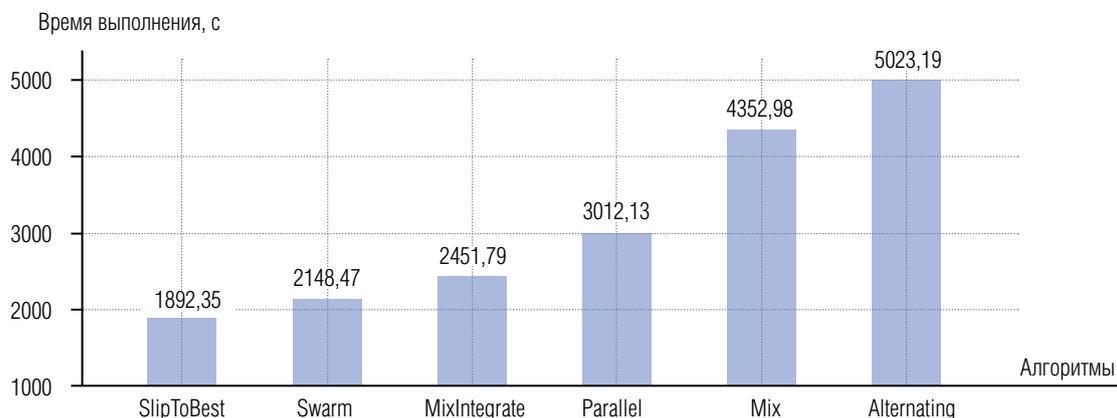


Рис. 5. Время выполнения для всех алгоритмов.

Алгоритмы MixIntegrate и Mix требуют 4591,87 и 6351,96 секунд соответственно, что объясняется их сложной гибридной структурой и необходимостью дополнительных итераций с мутацией и скрещиванием. Alternating, чередующий PSO и ГА, продемонстрировал наибольшее время выполнения – 6542,57 секунд, что обусловлено высокой вычислительной сложностью, несмотря на высокую точность получаемых решений.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что SlipToBest является наиболее эффективным с точки зрения скорости работы, что делает его оптимальным выбором для задач оперативного управления транспортными потоками. Parallel и Swarm показывают сбалансированные результаты и могут использоваться для решения практических задач оптимизации, когда важен компромисс между вычислительной сложностью и качеством решений. MixIntegrate и Mix, хотя и обеспечивают более точные решения, требуют оптимизации вычислительной нагрузки для повышения их практической применимости. Alternating, несмотря на наилучшее качество решений, требует значительных вычислительных ресурсов, что делает его более подходящим для задач, где приоритет отдан точности, а не скорости расчетов.

Полученные результаты подтверждают важность выбора алгоритма в зависимости от сценария моделирования. Дальнейшие исследования должны быть направлены на улучшение гибридных методов, обеспечивающих оптимальный баланс между вычислительной эффективностью и качеством решений.

В ходе экспериментов каждый алгоритм тестировался при различных начальных условиях, включая случайные начальные рои для PSO и различные популяции для ГА. Результаты показали, что SlipToBest не только демонстрирует наилучшее среднее время проезда, но и отличается высокой устойчивостью решений, показывая минимальную вариативность при изменении начальных параметров.

На рисунке 6 представлена динамика сходимости среднего времени проезда \bar{T} . Как видно из графика, SlipToBest быстрее остальных алгоритмов достигает минимального значения \bar{T} , благодаря целенаправленному сдвигу частиц роя к глобально лучшему решению. Alternating также демонстрирует высокое качество решений, однако в большинстве повторных экспериментов SlipToBest показывает более быстрое приближение к оптимуму.

Остальные алгоритмы (чистый PSO – Swarm, чистый ГА – Parallel, а также неструктурированные гибриды Mix и MixIntegrate) не смогли превзойти SlipToBest ни по сходимости, ни по устойчивости решений. Для формального подтверждения различий был проведен статистический анализ, включающий:

- ◆ Сравнение средних значений \bar{T} .
- ◆ Дисперсионный анализ.
- ◆ Непараметрические тесты на уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты статистического анализа подтверждают превосходство SlipToBest по среднему времени проезда и устойчивости получаемых решений.

При разработке гибридных эволюционных алгоритмов важную роль играет настройка ключевых параметров, включая:

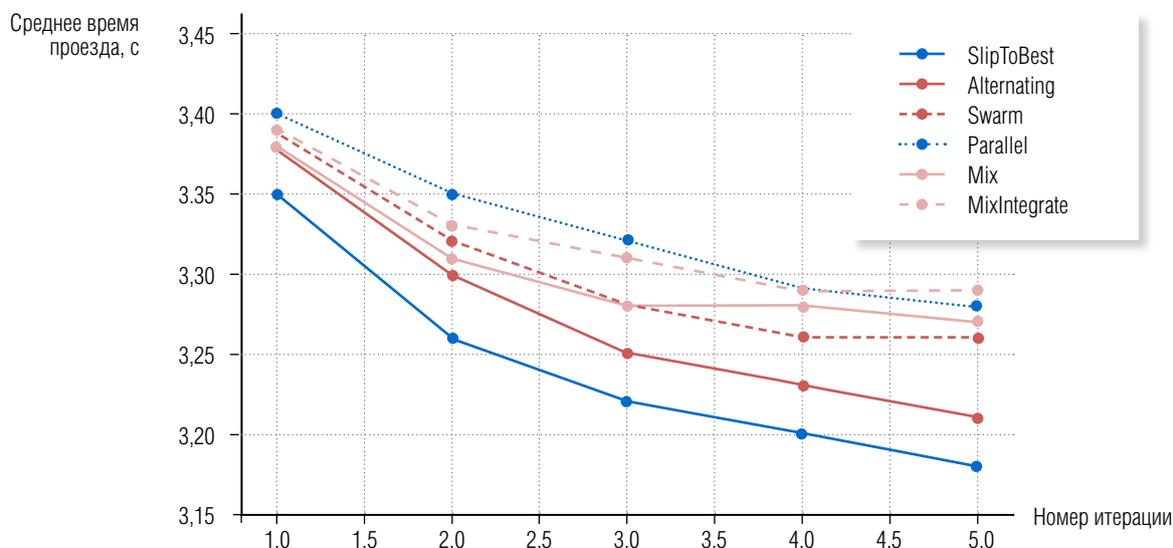


Рис. 6. Динамика сходимости среднего времени проезда.

- ◆ Коэффициенты PSO (w , c_1 , c_2) и размер роя.
- ◆ Параметр α в SlipToBest, определяющий интенсивность подтягивания роя к лучшему найденному решению.
- ◆ Параметры ГА ($mutationRate$, $crossoverRate$) и размер популяции при использовании гибридных схем.

Экспериментальные данные показывают, что чистые PSO и ГА в ряде случаев уступают по качеству поиска, а некорректное комбинирование операторов (Mix, MixIntegrate) может приводить к неэффективному распределению вычислительных ресурсов. Модификация SlipToBest решает эту проблему, усиливая способность роя частиц к быстрому и устойчивому поиску.

Результаты экспериментов позволяют сделать следующие ключевые выводы:

- ◆ SlipToBest является оптимальным выбором для оптимизации в сложных динамических системах, где важна быстрая сходимость к высококачественному решению.
- ◆ Оптимизация параметра α в SlipToBest (обычно в диапазоне 0,1–0,3) позволяет гибко настраивать компромисс между скоростью и точностью поиска.
- ◆ При ограниченных вычислительных ресурсах следует учитывать, что SlipToBest показывает одну из лучших скоростей работы (рис. 4), обеспечивая минимальное время проезда по сравнению с Alternating.
- ◆ Целенаправленная модификация ройного алгоритма позволяет добиться превосходства по средней метрике \bar{T} и устойчивости решений.
- ◆ Простая гибридизация (Mix, MixIntegrate) не гарантирует превосходства над чистыми алгоритмами, тогда как четкая структура чередования (Alternating) или направленный шаг к лучшему решению (SlipToBest) значительно повышают эффективность метода.

Таким образом, гибридные алгоритмы, при их грамотном структурировании, способны превосходить чистые PSO и ГА, обеспечивая оптимальное сочетание скорости сходимости и качества решений. Однако нерациональная комбинация операторов PSO и ГА может приводить к снижению эффективности, как это наблюдалось в случае Mix и MixIntegrate.

Заключение

В ходе настоящего исследования разработан и апробирован новый метод оптимизации характеристик интеллектуальной транспортной системы на основе гибридных эволюционных алгоритмов, направленных на повышение эффективности светофорного регулирования в локальных участках улично-дорожной сети. Для проведения экспери-

ментов была создана агентно-ориентированная модель в AnyLogic, моделирующая реальные условия дорожного трафика. В качестве базовых методов использовались генетический алгоритм (ГА) и алгоритм роя частиц (PSO), которые легли в основу разработанных гибридных схем.

На основе этих методов были созданы и исследованы шесть алгоритмических схем: Alternating, SlipToBest, MixIntegrate, Mix, а также чистые версии Swarm (PSO) и Parallel (ГА). Главным критерием оценки эффективности выступало среднее время проезда, дополненное показателем потерь топлива, что позволило учесть экологические и экономические аспекты.

Результаты сравнительных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

1. SlipToBest, являющийся модифицированным PSO с механизмом дополнительного «подтягивания» частиц к лучшему решению, показал наивысшие результаты как по скорости сходимости, так и по достижению оптимального решения.
2. Alternating, комбинируя ГА и PSO в четко структурированной схеме чередования, лишь незначительно уступает SlipToBest, однако обеспечивает более стабильные решения, за счет сбалансированного использования глобального и локального поиска.
3. Swarm (базовый PSO) продемонстрировал результаты лучше, чем Parallel (чистый ГА), однако уступил лидерам – SlipToBest и Alternating.
4. Неструктурированные гибриды (MixIntegrate и Mix) не смогли превзойти реализованные методы, что подчеркивает важность логичного проектирования гибридных схем.

Таким образом, простая комбинация ГА и PSO без четкой стратегии не дает значительных пре-

имуществ. Высокие показатели достигаются при использовании специфических модификаций, таких как механизм сдвига частиц к оптимуму в PSO (SlipToBest), либо структурированное чередование операторов ГА и PSO (Alternating).

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии и уточнении методов гибридизации эволюционных алгоритмов для интеллектуальных транспортных систем. Практическая ценность заключается в перспективах внедрения предложенных решений в реальное светофорное регулирование, что позволит сократить среднее время проезда, снизить расход топлива и уменьшить вредные выбросы.

Ограничения исследования связаны с локальным масштабом моделируемой дорожной сети и рядом упрощающих предположений о поведении водителей и пешеходов. В дальнейших исследованиях планируется расширение масштабов моделирования, учет сезонных и погодных факторов, а также интеграция адаптивных стратегий настройки параметров эволюционных алгоритмов с методами глубокого обучения и reinforcement learning.

Перспективным направлением развития является разработка гибридных алгоритмов, способных адаптироваться к динамически изменяющимся условиям дорожного движения. Это позволит еще более эффективно совершенствовать транспортную инфраструктуру и обеспечивать долгосрочные социально-экономические выгоды для городских транспортных систем. ■

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00080).

Литература

1. Зарипов Е.А., Мельников А.М., Акопов А.С. Имитационное моделирование и оптимизация транспортных потоков в локальных участках улично-дорожной сети с использованием системы AnyLogic // Информационные технологии. 2024. Т. 30. № 4. С. 183–189. <https://doi.org/10.17587/it.30.183-189>
2. Акопов А.С., Зарипов Е.А., Мельников А.М. Адаптивное управление транспортной инфраструктурой в городской среде с использованием генетического алгоритма вещественного кодирования // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 2. С. 48–66. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.2.48.66>
3. Eberhart R., Kennedy J. Particle swarm optimization // IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, 1995. P. 1942–1948.
4. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. MIT Press, 1992.
5. Clerc M., Kennedy J. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6. No. 1. P. 58–73.

6. Shi Y., Eberhart R. A modified particle swarm optimizer // IEEE International Conference on Evolutionary Computation. 1998. P. 69–73.
7. Bäck T., Fogel D.B., Michalewicz Z. Evolutionary computation 1: Basic algorithms and operators. CRC Press, 2000.
8. Wahde M. Biologically inspired optimization methods: An introduction. WIT Press, 2008.
9. Coello C.A.C., Lamont G.B., Van Veldhuizen D.A. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. Springer, 2007.
10. Yoshida H., Kawata K., Fukuyama Y., Takayama S., Nakanishi Y. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment // IEEE Transactions on Power Systems. 2000. Vol. 15. No. 4. P. 1232–1239. <https://doi.org/10.1109/59.898095>
11. Zhang Y., Wang S., Ji G. A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications // Mathematical Problems in Engineering. 2015. P. 1–38.
12. Ali M.Z., Pant M. Improving the performance of particle swarm optimization using differential evolution // IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2009. P. 105–112.
13. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. Particle swarm optimization // Swarm Intelligence. 2007. Vol. 1. No. 1. P. 33–57.
14. Engelbrecht A.P. Computational intelligence: An introduction. 2nd Edition. Wiley, 2007.
15. Goldberg D.E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley, 1989.
16. Michalewicz Z. Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs. Springer, 1996.
17. Haupt R.L., Haupt S.E. Practical genetic algorithms. 2nd Edition. Wiley, 2004.
18. Tsai P.W., Chiu S.W., Pan J.S., Liao B.Y. Enhancing particle swarm optimization with multicriterion for engineering optimization // Expert Systems with Applications. 2010.
19. Ong Y.S., Lim M.H., Zhu N., Wong K.W. Classification of adaptive memetic algorithms: A comparative study // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B. 2006.
20. Zhou A., Qu B.Y., Li H., Zhao S., Suganthan P.N., Zhang Q. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art // Swarm and Evolutionary Computation. 2011.
21. Bot D.M., Peeters J., Liesenborgs J., Aerts J. FLASC: A flare-sensitive clustering algorithm: extending HDBSCAN* for detecting branches in clusters // arXiv:2311.15887. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.15887>
22. Анферов М.А. Генетический алгоритм кластеризации // Russian Technological Journal. 2019. Т. 7. № 6. С. 134–150. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-134-150>
23. Бекларян А.Л., Бекларян Л.А., Акопов А.С. Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечеткой кластеризации // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 3. С. 70–86. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.70.86>

Об авторах

Зарипов Евгений Андреевич

младший научный сотрудник, лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

аспирант, ассистент, кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения, МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78;

E-mail: e.a.zaripov@ya.ru

ORCID: 0000-0003-1472-650X

Акопов Андраник Сумбатович

доктор технических наук, профессор; профессор РАН;

главный научный сотрудник, лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

профессор, кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения, МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78;

E-mail: akopovas@umail.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037

Modeling and optimization of the characteristics of intelligent transport systems for “smart cities” using hybrid evolutionary algorithms

Evgeniy A. Zaripov

E-mail: e.a.zaripov@ya.ru

Andranik S. Akopov

E-mail: akopovas@umail.ru

Central Economic Mathematical Institute, Moscow, Russia

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract

Modern cities are facing increasing traffic congestion, necessitating the implementation of intelligent traffic management systems. One of the key areas in this field is adaptive traffic signal control, which can adjust to changing traffic conditions. However, existing methods for optimizing traffic signal cycle parameters have several limitations, such as high computational complexity, the risk of premature convergence of algorithms and the difficulty of accounting for traffic dynamics. This study proposes an approach to optimizing the characteristics of an intelligent transportation system using hybrid evolutionary algorithms. The methods we developed combine the principles of genetic algorithms (GA) and particle swarm optimization (PSO), enabling a balance between global and local search for optimal parameters. The research examines six different hybridization schemes, including modified versions of basic algorithms, as well as their integration with HDBSCAN clustering methods for adaptive optimization frequency tuning. To evaluate the effectiveness of the proposed algorithms, a simulation model was developed in the AnyLogic environment, replicating real urban traffic conditions. Numerical experiments conducted on a local section of the road network in Moscow demonstrated that the hybrid SlipToBest algorithm achieves the best results in reducing average travel time and fuel consumption, while the Alternating algorithm (structured switching between GA and PSO) ensures high solution stability. The results of this study confirm the feasibility of using hybrid evolutionary methods for traffic flow management tasks. The proposed algorithms not only enhance the efficiency of traffic signal control but also establish a foundation for the further development of adaptive urban traffic management systems.

Keywords: intelligent transport systems, traffic infrastructure management, smart city, hybrid evolutionary algorithms, simulation modeling, traffic management, AnyLogic

Citation: Zaripov E.A., Akopov A.S. (2025) Modeling and optimization of the characteristics of intelligent transport systems for “smart cities” using hybrid evolutionary algorithms. *Business Informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 34–49. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.34.49

References

1. Zaripov E.A., Melnikov A.M., Akopov A.S. (2024) Simulation modeling and optimization of traffic flows in local sections of the street-road network using AnyLogic. *Information Technologies*, vol. 30, no. 4, pp. 183–189. <https://doi.org/10.17587/it.30.183-189>.
2. Akopov A.S., Zaripov E.A., Melnikov A.M. (2024) Adaptive control of transportation infrastructure in an urban environment using a real-coded genetic algorithm. *Business Informatics*, vol. 18, no. 2, pp. 48–66. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.2.48.66>
3. Eberhart R., Kennedy J. (1995) Particle swarm optimization. Proceedings of the *IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*, pp. 1942–1948.

4. Holland J.H. (1992) *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press.
5. Clerc M., Kennedy J. (2002) The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58–73.
6. Shi Y., Eberhart R. (1998) A modified particle swarm optimizer. Proceedings of the *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE, pp. 69–73.
7. Bäck T., Fogel D.B., Michalewicz Z. (2000) *Evolutionary computation 1: Basic algorithms and operators*, CRC Press.
8. Wahde M. (2008) *Biologically inspired optimization methods: An introduction*, WIT Press.
9. Coello C.A.C., Lamont G.B., Van Veldhuizen D.A. (2007) *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, Springer.
10. Yoshida H., Kawata K., Fukuyama Y., Takayama S., Nakanishi Y. (2000) A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment // *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1232–1239. <https://doi.org/10.1109/59.898095>
11. Zhang Y., Wang S., Ji G. (2015) A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications. *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1–38.
12. Ali M.Z., Pant M. (2009) Improving the performance of particle swarm optimization using differential evolution. Proceedings of the *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 105–112.
13. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. (2007) Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 33–57.
14. Engelbrecht A.P. (2007) *Computational intelligence: An introduction*. 2nd Edition, Wiley.
15. Goldberg D.E. (1989) *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley.
16. Michalewicz Z. (1996) *Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs*, Springer.
17. Haupt R.L., Haupt S.E. (2004) *Practical genetic algorithms*, 2nd Edition, Wiley.
18. Tsai P.W., Chiu S.W., Pan J.S., Liao B.Y. (2010) Enhancing particle swarm optimization with multicriterion for engineering optimization. *Expert Systems with Applications*.
19. Ong Y.S., Lim M.H., Zhu N., Wong K.W. (2006) Classification of adaptive memetic algorithms: A comparative study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*.
20. Zhou A., Qu B.Y., Li H., Zhao S., Suganthan P.N., Zhang Q. (2011) Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*.
21. Bot D.M., Peeters J., Liesenborgs J., Aerts J. (2023) FLASC: A flare-sensitive clustering algorithm: extending HDBSCAN* for detecting branches in clusters. *arXiv:2311.15887*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.15887>
22. Anfyorov M.A. (2019) Genetic clustering algorithm. *Russian Technological Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 134–150 (in Russian). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-134-150>
23. Beklaryan A.L., Beklaryan L.A., Akopov A.S. (2023) Simulation model of an intelligent transportation system for the ‘smart city’ with adaptive control of traffic lights based on fuzzy clustering. *Business Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 70–86. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.70.86>

About the authors

Evgeniy A. Zaripov

Junior Researcher, Laboratory of Dynamic Economic Models and Optimization, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Ave., 117418 Moscow, Russia;

PhD Student, Assistant Lecturer, Department of Instrumental and Applied Software, MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadsky Ave., 119454 Moscow, Russia;

E-mail: e.a.zaripov@ya.ru

ORCID: 0000-0003-1472-650X

Andranik S. Akopov

Doctor of Technical Sciences, Professor;

Professor of the Russian Academy of Sciences;

Chief Researcher, Laboratory of Dynamic Economic Models and Optimization, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Ave., 117418 Moscow, Russia;

Professor, Department of Instrumental and Applied Software, MIREA – Russian Technological University, Russia, 78, Vernadsky Ave., 119454 Moscow, Russia;

E-mail: akopovas@umail.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.50.71

Разработка нечеткой оптимизационной модели формирования портфеля мероприятий программы well-being для повышения производительности сотрудников

Л.С. Мазелис^a 

E-mail: lev.mazelis@vvsu.ru

Г.В. Гренкин^a 

E-mail: gleb.grenkin@vvsu.ru

К.И. Лавренюк^b 

E-mail: kir.lavrenyuk@mail.ru

А.А. Красько^a 

E-mail: andrey.krasko@vvsu.ru

^a Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия

^b ООО «Яндекс», Москва, Россия

Аннотация

Исследование проведено в рамках актуальной задачи изучения процессов развития человеческого капитала организации и повышения производительности труда сотрудников. При этом процесс развития рассматривается сквозь призму создания и имплементации различных элементов программы well-being (с англ. «благополучие» – комплекс мероприятий для улучшения внутреннего состояния сотрудников) в основные корпоративные бизнес-процессы организации. Цель данной работы – разработать нечеткий метод формирования оптимального портфеля мероприятий программы well-being, который позволит максимально приблизиться

к целевым значениям ключевых показателей эффективности (КПЭ) сотрудников на заданном горизонте планирования. Для достижения поставленной цели выдвигается гипотеза о возможности построения инструмента, позволяющего на основе функциональных зависимостей каналов влияния сформировать оптимальный портфель мероприятий программы well-being, повышающий эффективность работы организации. Разработанный метод состоит из модели, представляющей собой задачу нечеткого программирования, и метода нахождения ее решения. Отличительной чертой модели является учет двух уровней неопределенностей при формировании оптимального портфеля мероприятий, связанных с достоверностью оценок числовых коэффициентов функциональных зависимостей каналов влияния и набором параметров ограничений, определяемых экспертно. В качестве целевой функции модели используется интегральный показатель, который характеризует степень достижения целевых значений ключевых показателей эффективности сотрудников с учетом важности каждого из них для организации. В качестве переменных оптимизации в модели выступают бинарные переменные, которые определяют включение определенного мероприятия в программу well-being организации в конкретный момент времени в рамках заданного периода планирования. Ограничениями в модели являются: совокупный объем финансовых средств, направляемых на реализацию программы well-being; сумма инвестиций в конкретное направление программы well-being; прирост интегрального показателя компетентности каждого из сотрудников. С практической точки зрения предложенный метод позволит формировать обоснованный портфель мероприятий программы well-being, реализация которого оказывает максимально возможное положительное влияние на производительность труда сотрудников.

Ключевые слова: программа well-being, выгорание сотрудника, развитие компетентности, оптимизация портфеля мероприятий, нечетко-множественный подход

Цитирование: Мазелис Л.С., Гренкин Г.В., Лавренюк К.И., Красько А.А. Разработка нечеткой оптимизационной модели формирования портфеля мероприятий программы well-being для повышения производительности сотрудников // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 1. С. 50–71. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.50.71

Введение

В современном мире, где бизнес-среда становится все более динамичной и конкурентной, организации сталкиваются с необходимостью постоянно искать новые способы повышения эффективности и результативности своих сотрудников. Одним из действенных подходов, который привлекает внимание исследователей и практиков, является имплементация в бизнес-процессы well-being – комплексных мероприятий, направленных на улучшение благополучия сотрудников.

Программы well-being стали популярным инструментом для создания здоровой и продуктивной рабочей среды, поскольку они способствуют улучшению самочувствия сотрудников и повышению их производительности труда. Исследования показывают, что программы well-being могут оказывать положительное влияние на различные аспекты жизни сотрудников, включая физическое здоровье, эмоциональное состояние, социальные связи и профессиональное развитие. В результате компании, внедряющие well-being, могут ожидать улучшения качества работы своих сотрудников, снижения уровня стресса и повышения удовлетворенности. И, как след-

ствие, большую устойчивость кадрового обеспечения организации и улучшение в ней морального климата, что позволяет повысить конкурентоспособность организации на рынке труда.

Однако, несмотря на растущую популярность программ well-being, вопрос о том, какие именно мероприятия и подходы наиболее эффективны для достижения необходимых результатов, остается до сих пор открытым. Различные исследования предлагают разнообразные подходы к формированию программы well-being, которые могут отличаться по своей направленности, содержанию и методам реализации. Более того, зачастую реализация аналогичных программ well-being в различных организациях приводит к существенно разным результатам. Это говорит о том, что на эффекты от реализации программы также оказывают влияние внутренние и внешние факторы организации, обладающие значительной неопределенностью и сложностью прогнозирования. Это создает необходимость в проведении более глубоких исследований, направленных на разработку инструментов формирования оптимальной программы well-being для повышения производительности сотрудников.

Таким образом, актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки инструментов, которые позволят формировать оптимальный портфель мероприятий в рамках программы well-being для максимизации производительности труда сотрудников, которые будут учитывать существующие неопределенности и риски внутренней и внешней среды организации, а также имеющиеся ресурсные ограничения.

Объектом исследования является развитие человеческого капитала сотрудников и снижение их выгорания за счет реализации программы well-being, а предметом – нечеткий инструментальный формирование оптимального портфеля мероприятий программы well-being для максимизации достижения КПЭ сотрудников.

1. Анализ литературы

В рамках данной работы проведен комплексный анализ исследований, которые в той или иной степени затрагивают этапы развития сотрудников за счет реализации корпоративной программы well-being, описанные в рамках концептуальной модели в [1]. Исследования можно логически структурировать на несколько укрупненных групп.

1.1. Исследования, посвященные анализу влияния реализации программы well-being на развитие сотрудников организации

В [2] авторы доказали, что культура, в основе которой лежат принципы уважения, инклюзивности, справедливости и командной работы, существенно повышает проактивность сотрудников, при этом способствуя появлению инноваций и долгосрочному развитию организации.

Авторы [3] выявили связь между благополучием сотрудников и накоплением ими профессиональных знаний и навыков в организации.

Авторами [4] показано положительное взаимовлияние между некоторыми практиками управления персоналом (например, L&D, управление вовлеченностью персоналом) и развитием компетенций сотрудников.

В статье [5] авторы описали эффекты от непрерывного обучения руководителей сервисных предприятий и его влияние на развитие профессиональных компетенций. В исследовании [6] показано, что стремительное распространение профессионального образования вместо академического негативно влияет на развитие человеческого капитала.

Несмотря на незначительное количество работ, посвященных оценке влияния реализации корпоративной программы благополучия на развитие компетенций сотрудников, все они подтверждают наличие положительного влияния программы. Однако, в данных исследованиях рассмотрено либо влияние отдельных элементов well-being на компетентность сотрудников, либо влияние наличия самой программы на отдельные компетенции. Желательным является моделирование влияния целостной программы well-being на комплексное развитие компетентности сотрудников.

1.2. Исследования, посвященные анализу влияния реализации программы well-being на выгорание сотрудников организации

Авторы [7] доказали, что поддерживающая рабочая культура способствует повышению самочувствия, душевного здоровья, мотивации и удовлетворенности сотрудников от работы.

На основе анализа данных, полученных по итогам 240 интервью с медицинскими работниками, с использованием программы SPSS, авторами [8] сделаны выводы о существовании положительной взаимосвязи между благополучием сотрудников и воспринимаемой организационной поддержкой, отрицательной взаимосвязи между воспринимаемой организационной поддержкой и эмоциональным выгоранием, а также отрицательной и противоположной взаимосвязи между благополучием сотрудников и эмоциональным выгоранием.

В [9] сделаны выводы о влиянии реализации корпоративной программы социального обеспечения (часть программы well-being) на повышение удовлетворенности, вовлеченности, лояльности и продуктивности сотрудников и эффективности работы управленческой команды в условиях неопределенности.

В [10] проверены гипотезы о влиянии различных комбинированных мероприятий на рабочих местах на уровень выгорания сотрудников. Авторы отметили, что данные, на которых проводилось исследование, ограничены из-за высокой неоднородности, потенциальной предвзятости и их небольшого числа. Это требует дальнейшего изучения проблематики.

В [11] авторы описали основные тенденции в реализации концепции well-being организациями в целях мотивации деятельности сотрудников. В [12] доказано влияние реализации корпоративных программ управления здоровьем и благополучием на общее состояние сотрудников и их производительность труда.

Стоит отметить, что в рамках данных исследований доказано влияние как отдельных элементов корпоративной программы well-being, так и с учетом их синергии, на уровень выгорания сотрудников. Однако не до конца описана природа данного явления. В предлагаемой работе авторами исследуется гипотеза о том, что на уровень выгорания сотрудников, рассматриваемый как интегральный показатель на основе оценок лояльности, удовлетворенности и вовлеченности, оказывает влияние отклонение ожиданий сотрудников по наличию в организации конкретных мероприятий well-being от того, какие из них реально реализованы в ней. В свою очередь, ожидания сотрудников зависят от их ценностных ориентиров.

1.3. Исследования, посвященные анализу влияния развития компетентности сотрудников и уровня их выгорания на эффективность деятельности организации

Автор [13] предложил подход по повышению удовлетворенности сотрудников, базирующийся на выстраивании work-life balance, и продемонстрировал его влияние на устойчивое развитие организации.

В [14] авторы обосновали влияние социально-психологического фона на работе на работоспособность сотрудников через изменение уровня их выгорания. В [15] показали, что выгорание IT-специалистов влияет на скорость и качество выполнение рабочих задач.

Результаты [16] показывают, что рабочая среда, поддержка руководства, адаптивность и внутренняя мотивация оказывают сильнейшее влияние (прямое и косвенное) на производительность труда сотрудников. В [17] описано влияние некоторых практик управления персоналом на работу всей организации через их воздействие на компетенции сотрудников.

Результаты [18] показывают, что компетентность и должностные характеристики сотрудников оказывают существенное влияние на их трудовую мотивацию и эффективность работы. Авторами [19] показано, что развитие компетенций сотрудников обладает статистически значимым влиянием на устойчивость организации. В работах [20, 21] приводится описание влияния различных аспектов трудовой деятельности (таких как: профессиональной компетентности, рабочей среды, удовлетворенности работой, вознаграждения и др.) на эффективность труда среди работников.

В [22] приведены результаты исследования влияния организационной культуры и компетентности сотрудников на восприятие ими стресса и, тем самым, на их производительность труда.

В [23] изучены составляющие выгорания и их связь с показателями эффективности работы сотрудников. С помощью корреляционного анализа выборки было оценено, как различные факторы внутри компании влияют на выгорание сотрудников, а также как отдельные аспекты выгорания воздействуют на их продуктивность.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что в исследованиях достаточно подробно рассмотрены вопросы влияния на производительность труда сотрудника и организации в целом компетентности сотрудников и их уровня выгорания как отдельных сущностей. При этом слабо описано их комплексное влияние. Также стоит заметить, что в исследованиях проводится оценка влияния на интегральный показатель производительности или эффективности труда, а не на их отдельные аспекты, например, на КПЭ.

1.4. Исследования, посвященные оценке взаимосвязей между реализацией мероприятий программы well-being, компетентностью сотрудников, уровнем их выгорания и показателями эффективности организации, в рамках которых используется математический аппарат

Авторы [24] опровергли наличие взаимосвязи между корпоративной социальной ответственностью сотрудников и их благополучием. Для этого они проанализировали данные, полученные в ходе опроса 403 сотрудников, с помощью функционала SmartPLS программы Path Analysis.

В [25] авторы разработали количественную модель оценки влияния качества обустроенности рабочего места и вовлеченности на благополучие сотрудников в гостиничной сфере.

В [26] предложена модель, позволяющая выявить взаимосвязь между элементами мотивации и эффективностью работы сотрудников. Апробация модели позволила выявить наличие устойчивой и статистически значимой положительной связи между параметрами.

В [27] с помощью регрессионного анализа было подтверждено, что применение различных практик, которые способствуют улучшению эмоционального климата в коллективе и развитию лидерских качеств, положительно влияет на эффективность работы организации.

В [28] результаты, полученные с помощью метода SmartPLS, указывают на то, что благоприятная рабочая атмосфера и вовлеченность выступают в роли ресурсов, которые помогают предотвратить выгорание. При этом высшему руководству следует осторожно подходить к вопросу увеличения продолжительности рабочего дня.

В [29] продемонстрировано, что низкий уровень вовлеченности сотрудников в работу не всегда приводит к их выгоранию, и при этом чем больше сотрудники работают, тем сильнее они ощущают выгорание. В исследовании использовались цифровые двойники сотрудников, а для анализа явных и скрытых переменных и количественной оценки взаимосвязей применялся пакет LISREL.

Заметим, что в существующих исследованиях ранее не решалась задача нахождения оптимального портфеля мероприятий программы well-being с целью максимизации эффективности деятельности организации. В большинстве работ используются стандартные инструменты анализа данных, на основе которых делаются выводы о наличии или отсутствии взаимосвязей между различными параметрами системы.

При этом стоит отметить, что инструментальная часть портфельной оптимизации является достаточно разработанной. Так, например, фундаментальные принципы и подходы в области математического программирования были заложены в работе [30]. Также существуют иные подходы, часто используемые для формирования оптимальных портфелей и наборов проектов в промышленности и финансовом секторе, например, квадратичное программирование [31] и генетические оптимизационные алгоритмы [32]. Ранее авторы уже работали в области портфельной оптимизации, например, в работе [33] разработаны модели нечеткой многопериодной оптимизации для поддержки принятия решений при выборе портфеля проектов в рамках программы стратегического развития учреждения, позволяющие осуществлять поэтапное планирование портфеля проектов с учетом интересов и рисков заинтересованных сторон.

Дополнительно стоит заметить, что в связи с наличием неопределенностей, связанных со сбором данных на основе субъективной оценки сотрудника или его руководителя, отсутствием единых подходов к оценке выгорания, компетентности и иных сущностей, существует необходимость использования нечеткого подхода для моделирования имеющихся неопределенностей внутренней среды и минимизации возможных рисков.

* * *

В завершение стоит резюмировать недостатки существующих исследований, в том числе на nivelирование которых направлена данная работа:

- ◆ не учитываются эффекты от многопериодности процесса реализации корпоративных мероприятий программы well-being и возможность скользящего планирования;
- ◆ не учитываются оптимизационные аспекты формирования портфеля мероприятий корпоративной программы well-being с учетом эффектов от ее реализации;
- ◆ не учитывается наличие неопределенностей и рисков, связанных с использованием методов сбора субъективных начальных данных, которые являются одной из важных составляющих при построении математических моделей;
- ◆ слабо изучены эффекты от комплексного влияния корпоративной программы well-being на выгорание сотрудников и их компетентность;
- ◆ не в полной мере изучено комплексное влияние компетентности сотрудника и его уровня выгорания на результативность и эффективность его работы.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о наличии дефицита инструментальных средств, которые позволяют:

во-первых, описывать влияние программы well-being на развитие профессиональных и личностных компетенций сотрудников, их выгорание и результативность работы и, следовательно, на эффективность функционирования организации в целом;

во-вторых, при ограниченных ресурсах, высокой конкуренции за кадры, рисках и неопределенностях сформировать оптимальный комплекс мероприятий программы well-being, который будет способствовать максимальному приближению к целевым значениям показателей эффективности работы как отдельного сотрудника, так и организации в целом.

2. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка нечеткого метода формирования оптимального портфеля мероприятий программы well-being, который позволит максимально приблизиться к целевым значениям ключевых показателей эффективности сотрудников на заданном горизонте планирования.

Выдвигается гипотеза о возможности создания инструмента, который позволит формировать оптимальный комплекс мероприятий программы well-being, способствующий росту эффективности

деятельности организации на основе сбалансированного по сотрудникам и временным интервалам повышения уровня компетентности и снижения выгорания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать нечеткую динамическую модель формирования оптимального портфеля мероприятий программы well-being с учетом имеющихся ресурсных ограничений организации. Реализация мероприятий программы в зависимости от того, к какому направлению они относятся, оказывает влияние на развитие профессиональных и личностных компетенций сотрудников и снижение их выгорания, что в совокупности позволяет максимально приблизиться к достижению целевых значений КПЭ сотрудников и целей организации в целом.

2. Разработать метод нахождения решения нечеткой оптимизационной модели, позволяющий для каждого временного интервала на горизонте планирования для каждого сотрудника определить набор мероприятий программы с учетом ресурсных ограничений на их реализацию, имеющихся в организации.

3. Нечеткая оптимизационная модель формирования портфеля мероприятий корпоративной программы well-being

Рассмотрим работу сотрудников организации на горизонте планирования T . В каждый момент времени $t \in \{0, 1, \dots, T\}$ компания инвестирует в реализацию различных мероприятий своей программы well-being, которые оказывают влияние на развитие профессиональных и личностных компетенций сотрудников и снижение их выгорания в момент времени $(t + 1)$. При этом сотрудники с учетом их компетентности в момент времени t влияют на достижение как своих КПЭ, так и организации в целом в момент времени $(t + 1)$. Важным аспектом является то, что в коммерческих компаниях достижение целей в момент времени t оказывает непосредственное влияние на объем инвестиций, направляемых в программу well-being в момент времени $(t + 1)$.

Отметим, что одни и те же сотрудники при изменном уровне их компетентности и сохранении бизнес-процессов на различных временных интервалах могут достигать разные значения КПЭ в организации. Это связано с тем, что на производительность и эффективность труда сотрудника оказывает

влияние степень его выгорания. Под степень выгорания сотрудника понимается его агрегированное физическое и эмоциональное состояние, которое влияет на то, насколько быстро он выполняет свою работу и насколько часто допускает ошибки в бизнес-процессах, за которые отвечает. Авторами работы [34] показано, что выгорание является следствием отклонения ожиданий сотрудника по реализуемым организацией корпоративной и рабочей политикам от реальности (т.е. это отклонение ожиданий сотрудника по наличию в организации тех или иных мероприятий программы well-being от того, что в организации реально имеется).

В работе [1] авторами предложена концептуальная модель развития компетентности сотрудников и уменьшения их выгорания за счет реализации программы well-being. В условиях неопределенностей, рисков и ограниченности ресурсов перед руководством организации стоит задача оптимального распределения финансовых средств между мероприятиями корпоративной программы well-being, позволяющего повысить результативность работы сотрудников и компании в целом через

прямое или косвенное влияние на развитие компетенций сотрудников и их выгорание (рисунк 1). В качестве показателей результативности используются КПЭ сотрудников.

В работах [34–36] построены функциональные зависимости каналов влияния, приведенных в концептуальной модели (рис. 1).

Рассмотрим работу сотрудников организации на горизонте планирования T . В каждый момент времени $t = 0, 1, \dots, T$ компания инвестирует ресурсы в реализацию мероприятий программы well-being. Каждое из этих мероприятий может относиться к разным сотрудникам. Их реализация влияет как на компетентность сотрудников, так и на изменение отклонений ожиданий сотрудника о наличии элементов в корпоративной программе well-being и их реализации, что в динамике приводит к изменению уровня их выгорания.

Каждое мероприятие программы well-being, требующее вложения определенных финансовых средств, относится к определенному направлению (вся программа разбита на K направлений) и на-

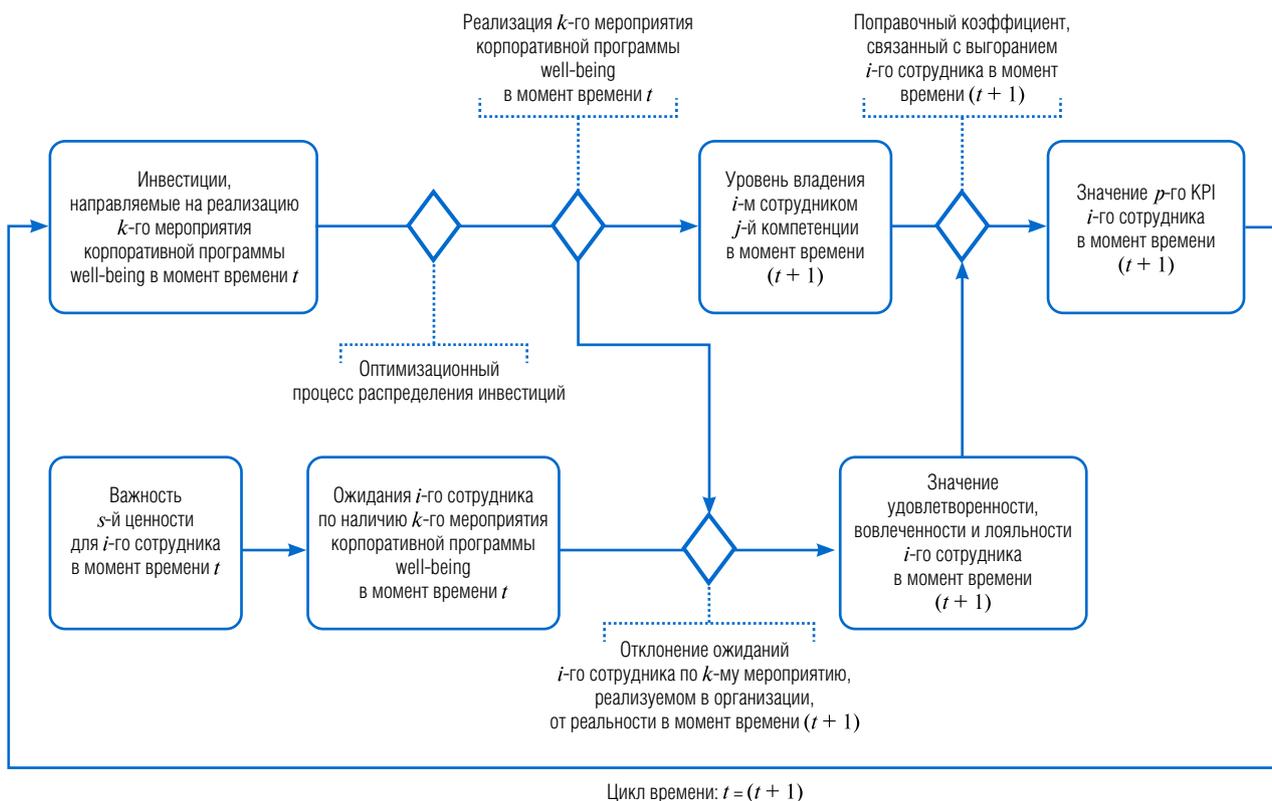


Рис. 1. Концептуальная модель описания процесса развития компетентности сотрудников организации.

правлено на некоторое множество сотрудников. Обозначим через $z_{ik}(t)$ объем инвестиций, приходящийся на i -го сотрудника, при реализации всех мероприятий программы, относящихся к k -му направлению well-being.

Целью оптимизации в рамках исследования является максимизация интегрального показателя V , описывающего степени достижения целевых значений КПЭ сотрудников

$$V = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\sum_{m=1}^M \beta_m \cdot \frac{y_{im}(T)}{\tilde{y}_{im}} \right) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $y_{im}(t)$ – значение m -го КПЭ i -го сотрудника в момент времени t ;

β_m – коэффициент важности m -го КПЭ;

\tilde{y}_{im} – целевое значение m -го КПЭ для i -го сотрудника;

i – номер сотрудника организации, $i = 1, 2, \dots, I$;

m – номер КПЭ сотрудника, $m = 1, 2, \dots, M$.

Рассмотрим построенные функциональные описания каналов влияния, приведенных в концептуальной модели (рис. 1).

1. В работе [36] представлены эконометрические модели панельных данных, которые функционально описывают зависимости между структурой и объемами финансовых средств в мероприятия по различным направлениям программы well-being и уровнями владения сотрудником различными компетенциями:

$$x_{ij}(t+1) = \gamma_j x_{ij}(t) + \sum_{k=1}^K \alpha_{jk} z_{ik}(t), \quad (2)$$

где x_{ij} – уровень развития j -й компетенции i -го сотрудника в момент времени t ;

$z_{ik}(t)$ – объем инвестиций в i -го сотрудника компании по k -му направлению well-being в момент времени t .

Для избавления от мультиколлинеарности и уменьшения размерности с сохранением максимальной информации применялся метод главных компонент, в котором для преодоления трудностей в интерпретации матрицы нагрузок использовался метод без вращения.

2. Канал влияния инвестиций в реализацию мероприятий программы well-being на изменение отклонений ожиданий сотрудника от реального состояния корпоративной программы описывается следующим образом:

$$q_{ik}(t+1) = \max \left\{ \min \left\{ q_{ik}(t) + 2 \frac{z_{ik}(t) - \mu_k}{v_k - \mu_k}, 1 \right\}, -1 \right\}, \quad (3)$$

где $q_{ik}(t)$ – отклонение ожиданий i -го сотрудника от реализации k -го направления well-being, $q_{ik}(t) \in [-1, 1]$;

μ_k – минимальный объем инвестиций в k -е направление на одного сотрудника в один квартал, начиная с которого происходит изменение ожидания;

v_k – максимальный объем инвестиций в k -е направление на одного сотрудника в один квартал, после которого изменения ожидания уже не происходит.

3. В работе [34] предложена нечеткая модель зависимости выгорания сотрудников от отклонений между ожиданиями сотрудников по наличию элементов в корпоративной среде компании и реальным наполнением программы благосостояния, включающая несколько этапов:

i) формирование интегрального показателя ожиданий E_i^{HHT} , равного взвешенной сумме чисел $a_{ik} q_{ik}$, где a_{ik} (от 0 до 1) – коэффициент важности k -го направления мероприятий well-being для i -го сотрудника, q_{ik} – степень удовлетворенности сотрудника реализацией k -го мероприятия (от -1 до 1);

ii) представление областей множества значений показателей выгорания и интегрального показателя ожиданий в виде объединения непересекающихся промежутков различной длины, каждый из которых рассматривается как некоторая категория соответствующего показателя; оптимальные весовые множители и границы нечетких категорий находятся минимизацией функционала качества разбиения

$$J = \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S u_{is} d_s^2 (E_i^{HHT}), \quad (4)$$

где d_s – расстояние от точки на оси интегрального показателя ожиданий до s -го интервала;

u_{is} – мера принадлежности i -й точки s -му интервалу;

iii) решение задачи оптимизации находится итерационно: а) нахождение оптимального разделения точек на классы минимизацией функционала при фиксированных весовых коэффициентах w_k , б) нахождение весовых коэффициентов при заданном разделении точек на классы решением задачи безусловной оптимизации функционала

$$\frac{J}{\|w\|^2}, \text{ где } w = (w_1, w_2, \dots, w_k);$$

iv) построение матрицы соответствия между нечеткими категориями интегрального показателя ожиданий и уровня выгорания.

После дефаззификации нечеткой кусочно-постоянной регрессии, построенной на основе матрицы соответствия, получаем зависимость показателя выгорания i -го сотрудника от интегрального показателя ожиданий:

$$b_i(t) = \psi(a_{i1}q_{i1}(t), \dots, a_{ik}q_{ik}(t)). \quad (5)$$

График данной зависимости представлен на рисунке 2.

4. В работе [35] представлена нечеткая модель, которая позволяет оценить влияние компетенций и уровня выгорания сотрудников на достижение ими ключевых показателей эффективности. Модель включает в себя несколько этапов:

- i) формирование интегрального показателя компетентности сотрудников в виде взвешенной суммы отдельных профессиональных и личностных компетенций с оптимальными значениями весовых коэффициентов;
- ii) построение нечетких категорий для интегрального показателя компетентности и каждого КПЭ:
 - ◆ представление области значений каждого показателя в виде объединения непересекающихся промежутков различной длины, каждый из которых рассматривается как некоторая категория компетентности сотрудника (КПЭ);

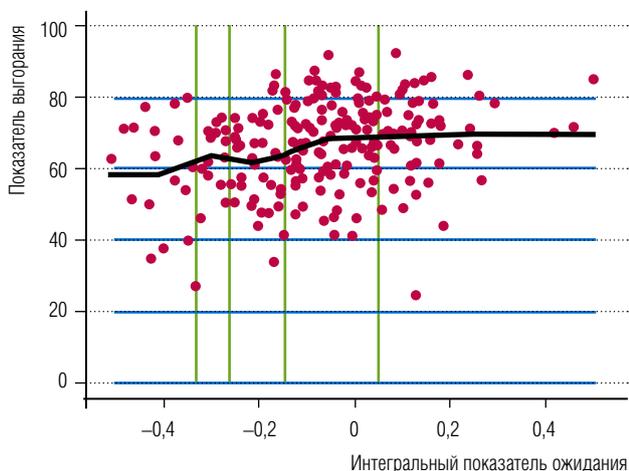


Рис. 2. Зависимость показателя выгорания i -го сотрудника от интегрального показателя ожиданий.

◆ построение категорий проводится на основе минимизации функционала кросс-энтропии и каждый элемент выборки описывается нечетким числом, характеризующим степень принадлежности элемента к построенным категориям;

iii) корректировка значений КПЭ с учетом выгорания путем расчета приведенного КПЭ на основе решения задачи минимизации отклонений взвешенным методом наименьших квадратов с учетом нечеткой принадлежности точек категориям;

iv) построение выборочного распределения КПЭ для каждой категории интегрального показателя компетентности на основе построенной матрицы соответствия, которая определяет распределение точек, принадлежащих к одной категории компетентности. Это позволит оценивать вероятность возможных значений КПЭ для конкретных значений компетенций и выгорания.

Дефаззифицируя найденную зависимость, получим

$$\frac{y_{im}(t)}{\tilde{y}_{im}} = \varphi_m(x_{i1}(t), \dots, x_{ij}(t)) + W_{m0} + W_{m1}b_i(t), \quad (6)$$

где x_{ij} – уровень развития j -й компетенции i -го сотрудника в момент времени t ;

$b_i(t)$ – интегральный показатель выгорания i -го сотрудника.

Зависимость КПЭ i -го сотрудника от интегрального показателя компетентности представлена на рисунке 3.

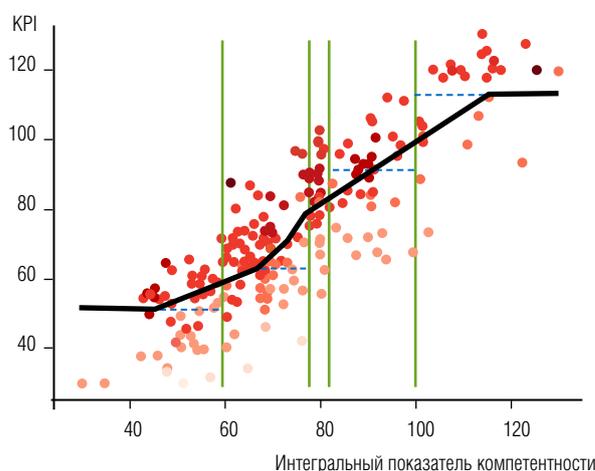


Рис. 3. Зависимость КПЭ i -го сотрудника от интегрального показателя компетентности.

В качестве ограничений в оптимизационной модели будем использовать следующие:

1. Суммарный объем финансовых средств $Z(t)$, инвестируемых в программу well-being, ограничен бюджетом организации и определяется ее C-level в рамках стратегии управления персоналом компании:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I z_{ik}(t) \leq Z(t). \quad (7)$$

Бюджет определяется топ-менеджментом в рамках формирования кадрового плана в зависимости от определенных циклов в компании.

2. Будем считать, что инвестиции в каждое из направлений well-being формируются как сумма некоторого числа мероприятий, в которых участвует сотрудник. Каждое мероприятие характеризуется стоимостью на одного человека. Следовательно, $z_{ik}(t)$ равняется сумме стоимостей выбранных мероприятий, относящихся к k -му направлению. Существует максимально допустимая сумма инвестиций, которую компания может направить в то или иное направление well-being:

$$\sum_{i=1}^I z_{ik}(t) \leq Z_k(t), \quad (8)$$

где $Z_k(t)$ – ограничение на инвестиции в k -е направление well-being, представляющее собой трапециевидное нечеткое число, экспертно задаваемое менеджерами компании.

Данное ограничение делается для того, чтобы лица, ответственные за well-being, не направляли все инвестиции в наиболее простые и затратные мероприятия, а старались затрагивать как можно больше аспектов well-being.

3. За одну единицу времени прирост интегрального показателя компетентности за счет инвестиций в корпоративную программу не превосходит нечеткой величины c :

$$\sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J w_j \alpha_{jk} \right) z_{ik}(t) \leq c. \quad (9)$$

Таким образом, оптимизационная модель формирования корпоративной программы well-being, влияющих на КПЭ сотрудников через развитие их компетенций с учетом выгорания, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} f(T) &= \frac{1}{T} \sum_{i=1}^I \left[\varphi(x_{i1}(T), \dots, x_{iI}(T)) + W_0 + \right. \\ &\quad \left. + W_1 \psi(a_{i1} q_{i1}(T), \dots, a_{iK} q_{iK}(T)) \right] \rightarrow \max \\ q_{ik}(t+1) &= \max \left\{ \min \left\{ q_{ik}(t) + 2 \frac{z_{ik}(t) - \mu_k}{v_k - \mu_k}, 1 \right\}, -1 \right\}, \\ &t = 0, \dots, T-1 \\ x_{ij}(t+1) &= \gamma_j x_{ij}(t) + \sum_{k=1}^K \alpha_{jk} z_{ik}(t), t = 0, \dots, T-1 \\ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I z_{ik}(t) &\leq Z(t), t = 0, \dots, T-1 \\ \sum_{i=1}^I z_{ik}(t) &\leq Z_k(t), t = 0, \dots, T-1, k = 1, \dots, K \\ \sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J w_j \alpha_{jk} \right) z_{ik}(t) &\leq c, k = 1, \dots, K, i = 1, \dots, I \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Отметим, что ограничения на инвестиции в k -е направление well-being и прирост компетентности отдельного сотрудника представляют собой нечеткие неравенства.

Предложенная модель представляет собой задачу нечеткого программирования в связи с тем, что часть параметров являются нечеткими числами. Для решения этой задачи по поиску оптимального портфеля мероприятий программы будет использоваться подход, описанный в работах [37, 38] и позволяющий свести ее к четкой задаче при заданных уровнях достоверности.

Зададим уровни достоверности λ_{zk}, λ_c для ограничений на инвестиции в k -е направление well-being и рост интегрального показателя компетентности сотрудников соответственно. В таком случае система ограничений модели примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} N_{\sum_{i=1}^I z_{ik}(t)}(Z_k(t)) &\geq \lambda_{zk} \\ N_{\sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J w_j \alpha_{jk} \right) z_{ik}(t)}(c) &\geq \lambda_c. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Здесь $N_A(B) > \lambda$ означает, что число A удовлетворяет ограничению B с уровнем достоверности λ . Это условие эквивалентно неравенству:

$$\min_x \max(1 - \mu_A(x), \mu_B(x)) > \lambda, \quad (12)$$

где $\mu_Y(x)$ – функция принадлежности нечеткого числа Y .

В частности, пусть объем инвестиций в k -е направление мероприятий программы well-being в момент времени t задано нечетким трапециевидным числом $\sum_{i=1}^4 z_{ik}(t) = (z_1, z_2, z_3, z_4)$, так же нечетким трапециевидным числом задано ограничение на максимальный объем инвестиций в k -е направление программы well-being и имеет представление $Z_k(t) = (0, 0, r_3, r_4)$. Тогда, ограничение $N_{\sum_{i=1}^4 z_{ik}(t)}(Z_k(t)) \geq \lambda_{zk}$ равносильно:

$$\left[(1 - \lambda_{zk}) \cdot z_3 + \lambda_{zk} \cdot z_4 \right] \leq \lambda_{zk} \cdot r_3 + (1 - \lambda_{zk}) \cdot r_4. \quad (13)$$

Аналогичным образом, нечеткие неравенства преобразуются в четкие, что позволяет получить четкую задачу булева программирования, где переменные определяют, будет ли конкретное мероприятие включено в программу или нет.

Для нахождения субоптимального решения проведем линеаризацию зависимостей:

1. Для линеаризации функции φ в точке x найдем коэффициент наклона зависимости. На границе между классами значение коэффициента наклона вычисляется как угловой коэффициент соответствующего отрезка кусочно-линейной функции. В остальных точках x коэффициент наклона линейно интерполируется.

2. Для линеаризации зависимости $q_{ik}(t + 1)$ от $z_{ik}(t)$ заметим, что число возможных значений переменной $z_{ik}(t)$ невелико (на реальных данных оно в среднем равно 25). Следовательно, если ввести бинарные переменные, соответствующие каждому i , каждому k и каждому из возможных значений $z_{ik}(t)$ и вычислить, на сколько изменится степень достижения КПЭ при таком вложении, получим задачу целочисленного линейного программирования. При этом потребуется ввести ограничение на переменные, относящиеся к определенному i и определенному k : их сумма должна равняться 1. Чтобы найти множество возможных значений переменных $z_{ik}(t)$, применяем метод динамического программирования.

Для решения задачи целочисленного линейного программирования используем пакет `scipy.optimize.milp` в языке Python. Программная реализация доступна в репозитории <https://github.com/lapkin25/fuzzy-data-clustering> в папке `fuzzy_optimization`.

4. Результаты апробации предложенного метода на примере подразделений коммерческой компании

Для примера рассмотрим задачу формирования оптимального портфеля мероприятий в рамках программы well-being для максимального приближения к целевым значениям КПЭ сотрудников в течение года, декомпозированного на четыре периода (квартала).

Рассмотрены ИТ и HR структурные подразделения коммерческой организации с общей штатной численностью 95 сотрудников. Описание процесса сбора начальных данных для данного примера представлено в работах авторов [1, 34, 36]. Отметим, что в начальный момент времени $t = 0$ средние значения компетентности сотрудников по личностным качествам составляет нечеткое число {61; 68; 84; 91}, по профессиональным качествам в разрезе HR-функционала – {49; 55; 67; 73}, а для ИТ – {38; 43; 53; 58}. При этом значения показателей, характеризующих уровень выгорания, составляют: лояльность $b_1(0) = \{46; 52; 64; 70\}$; вовлеченность $b_2(0) = \{57; 64; 78; 85\}$; удовлетворенность $b_3(0) = \{57; 64; 78; 85\}$.

КПЭ и их целевые значения в рамках целевой функции выбраны сообразно стратегическим целям компании. При этом начальное значение интегрального показателя КПЭ сотрудников составляет 71,4%.

У каждого мероприятия имеется набор характеристик, на основе которых принимается решение о включении в программу well-being: минимальная и максимальная стоимость; минимальное и максимальное количество сотрудников, которые могут одновременно принимать в нем участие; продолжительность мероприятия, на которое оно рассчитано. Пример мероприятий приведен в *таблице 1*.

Построенная модель позволяет после нахождения численного решения сформировать оптимальный портфель мероприятий корпоративной программы well-being и соответствующую ему структуру распределения финансовых ресурсов по различным направлениям инвестирования программы, сотрудникам и моментам времени. При этом программа актуализируется для каждого следующего квартала в зависимости от достигнутых результатов в текущем.

Рассмотрим полученные результаты решения модели при условии ограничения объема инвестиций в программу well-being в размере 12,5 млн.

Таблица 1.

Пример мероприятий программы well-being

Направление well-being	Мероприятие	Мода стоимости, тыс. руб.	Количество сотрудников, чел.	Период времени
Реализация корпоративных льгот	Добровольное медицинское страхование	80	1	12
	Корпоративные скидки у партнеров	6	1	1
	Отчисления в некоммерческий пенсионный фонд	10	1	1
	Дополнительные дни отпуска	25	1	12
	Корпоративная бонусная программа	10	1	1
Интеграция сотрудника в процессы его отрасли	Участие спикеров в отраслевой конференции	60	1	1
	Публикация авторских статей	40	1	1
	Организация отраслевых комьюнити	1300	100	3
	Организация Team Day	7000	500	6
...

рублей в квартал. При этом результаты зависят от уровня доверия (λ), который задается менеджментом компании и является некоторой мерой жесткости при задании конкретных параметров в нечетком виде, т.е. чем ближе значение к 1, тем более жестким является параметр (при этом 0,5 соответствует базовому значению). В *таблице 2* приведены значения уровней доверия для примера в зависимости от сценария.

Так, сценарий 1 описывает ситуацию, когда для организации важно направлять определяемую более жестко сумму финансовых средств в развитие компетентности своих сотрудников, чтобы они росли карьерно внутри организации (такая структура характеризует HR-стратегию компании, направленную на возвращение внутреннего человеческого капитала). Данный сценарий затрагивает такие блоки направлений программы, как «Окружающая среда», «Карьерное развитие» и «Развитие навыков». При этом инвестиции в остальные блоки направлений обладают определенным гэпом и определяются скорее особенностями команды, которая работает в компании.

Сценарий 2 возникает при условии важности для организации создания позитивной и прозрачной корпоративной среды (т.е. HR-стратегия направлена на создание позитивного бренда работодателя и привлечение экспертов с внешнего рынка). Данный сценарий затрагивает такие блоки направлений программы, как «Финансовое благополучие»,

«Здоровый образ жизни» и «Корпоративная инфраструктура».

Сценарий 3 создает ситуацию, в которой организация не отдает свои предпочтения ни одному из направлений программы well-being. Данный сценарий подходит в том случае, когда компания хочет создать комбинированную HR-стратегию и определить направления, которые дадут наибольший эффект в зависимости от особенностей команды.

Далее рассмотрим структуру распределения финансовых средств за год для трех сценариев (*рис. 4*).

Анализируя данные *рисунка 4*, отметим:

- 1) в рамках сценария 1 приоритетными направлениями программы well-being, в которые направляется около 43%, являются «Внешнее развитие SOFT компетенций» (10,7%), «Реализация системы работы с талантами» (10,4%), «Интеграция сотрудника в процессы его отрасли» (10%), «Формирование адаптивных рабочих процессов» (7,2%) и «Организация правильного питания» (5%). Как можно заметить, наибольший объем инвестиций приходится в направления, которые входят в приоритетные блоки программы и позволяют в наибольшей степени повлиять на развитие компетентности сотрудников;
- 2) в рамках сценария 2 приоритетными направлениями программы well-being, в которые направляется около 42%, являются «Формирование адаптивных рабочих процессов» (9,4%), «Ин-

Таблица 2.

Значения уровней доверия

Параметр	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Интегральный показатель компетентности	0,6	0,6	0,6
Ограничение на объем инвестиций по блоку well-being «Финансовое благополучие»	0,6	0,9	0,7
Ограничение на объем инвестиций по блоку well-being «Окружающая среда»	0,9	0,6	0,7
Ограничение на объем инвестиций по блоку well-being «Карьерное развитие»	0,9	0,6	0,7
Ограничение на объем инвестиций по блоку well-being «Здоровый образ жизни»	0,6	0,9	0,7
Ограничение на объем инвестиций по блоку well-being «Развитие навыков»	0,9	0,6	0,7
Ограничение на объем инвестиций по блоку well-being «Корпоративная инфраструктура»	0,6	0,9	0,7

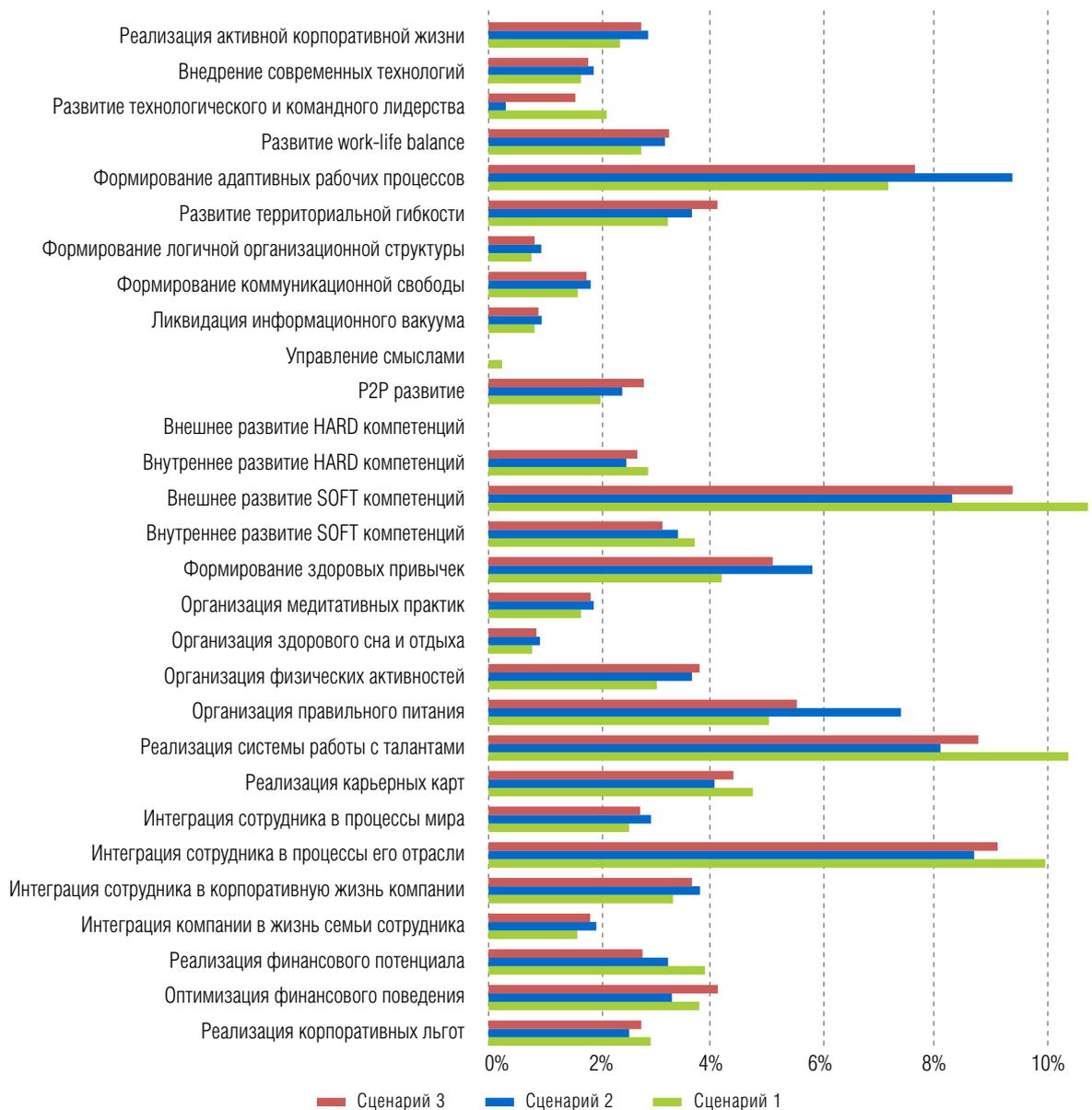


Рис. 4. Структура распределения финансовых ресурсов в направления программы well-being по 3-м сценариям.

теграция сотрудника в процессы его отрасли» (8,7%), «Внешнее развитие SOFT компетенций» (8,3%), «Реализация системы работы с талантами» (8,1%) и «Организация правильного питания» (7,4%). Заметим, что набор приоритетных направлений является аналогичным сценарию 1, но при этом структура инвестиций претерпела существенные изменения. Так, больший объем финансовых средств стал инвестироваться в направления программы, которые входят в приоритетные блоки в рамках определенной стратегии;

3) в рамках сценария 3 отмечается аналогичная тенденция с точки зрения приоритетных направлений, но также меняется структура распределения финансовых ресурсов.

При это для всех сценариев объем инвестиций в два направления («Внешнее развитие hard компетенций» и «Управление смыслами») практически равен нулю. Это можно объяснить низким эффектом для развития компетенций или снижения уровня выгорания сотрудников от реализации мероприятий в рамках этих направлений программы.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать о том, что λ оказывает существенное влияние на формирование портфеля мероприятий программы well-being, а также на принятие решения о структуре финансирования тех или иных направлений программы.

Также исследования показали, что для большинства направлений программы динамика изменения объема финансовых средств в зависимости от λ является монотонной (возрастающей или убывающей). Так, объем финансовых средств возрастает при росте степени доверия для таких направлений, как «Реализация корпоративных льгот», «Интеграция сотрудника в корпоративную жизнь компании», «Реализация системы работы с талантами», «Внутреннее развитие hard компетенций» и пр., но при этом существует и обратная динамика для направлений «Интеграция сотрудника в процессы его отрасли» и «Развитие технологического и командного лидерства».

Проведя анализ результатов в разрезе сотрудников, можно заметить, что наибольший объем финансовых средств направляется в работников, обладающих следующим портретом: «Сотрудник с общим стажем работы 3–6 лет в возрасте 31–40 лет. Занимает позицию, уровень которой выше старшего специалиста. Работает в IT направлении. Обладает низкими значениями по ряду личностных компетенций и высокими значениями по профес-

сиональным компетенциям. Уровень выгорания ниже среднего значения по компании».

Итоговые значения прироста интегрального показателя КПЭ за 1 год составили: при сценарии 1 – 11,85 единиц; при сценарии 2 – 11,8; при сценарии 3 – 12. Как можно заметить, при условии идентичных суммарных объемов инвестиций в направления программы well-being, ключевым критерием принятия решения является итоговое значение интегрального КПЭ. В рамках данного примера рекомендуется выбрать сценарий под номером 3, т.е. сценарий, в котором искусственно менеджментом компании не приоритизируются конкретные направления программы. Таким образом, предложенный авторами инструмент самостоятельно позволяет определять оптимальный портфель мероприятий программы с учетом начальных входных параметров.

Итоговый портфель мероприятий имплементируется в корпоративную программу well-being. Можно рекомендовать осуществлять гибкую поквартальную корректировку портфеля, т.к. по итогам реализации конкретных мероприятий можно более точно оценить их влияние на развитие компетентности конкретной группы сотрудников и снижение их выгорания. Таким образом, это позволит ввести еще один показатель для мероприятий с точки зрения вклада каждого из них в интегральный показатель КПЭ. В рамках будущих исследований планируется собрать набор ретроспективных данных по мероприятиям для модификации предложенной модели и повышения ее точности.

5. Дискуссия

В большинстве работ, посвященных изучению эффектов от реализации корпоративной программы well-being для функционирования организации, подтверждается факт ее влияния на человеческий капитал компании, в частности на производительность труда ее сотрудников. При этом данные исследования рассматривают не цельный процесс развития человеческого капитала через программу (от инвестиций в благополучие сотрудников до результативности их работы), а скорее его отдельные фрагменты. Так, в [3, 4, 7, 8] описано влияние программы на различные аспекты компетентности сотрудников и уровня их выгорания. А в [14, 18, 22] – различных элементов компетентности сотрудников и их выгорания на результативность и эффективность их работы. Также существует ряд исследований, в рамках которых предложены эко-

номико-математические модели, описывающие взаимосвязи между различными элементами развития человеческого капитала за счет реализации программы well-being (например, [26, 27]).

Стоит заметить, что в существующих работах, с одной стороны, не учитывается дифференцированное влияние направлений программы well-being на различные аспекты работы сотрудников, с другой стороны, синергетические эффекты, возникающие от реализации сразу нескольких направлений. В качестве еще нескольких недостатков можно отметить то, что в исследованиях никак не рассматриваются эффекты от многопериодности реализации таких программ и оптимизационные аспекты для их формирования.

При разработке модели в рамках данного исследования были учтены вышеописанные недостатки, а также запросы от реальных коммерческих организаций.

Также отличительной чертой модели является учет двух уровней неопределенностей при формировании оптимального портфеля мероприятий программы well-being. Первый уровень связан с достоверностью оценок числовых коэффициентов функциональных зависимостей каналов влияния, найденных дефазсификацией нечетких кусочно-постоянных регрессий, построенных на основе матриц соответствия между нечеткими категориями интегральных показателей ожиданий, компетенций, уровней выгорания и ключевых показателей эффективности. Вторым уровнем – с необходимостью задания ряда параметров ограниченных, определяемых экспертно (например, на объем финансовых средств, инвестируемых в конкретное направление программы) в виде нечетких чисел.

Помимо этого, предложенный метод за счет многопериодности построенной модели и возможности корректировки сформированного на весь горизонт планирования портфеля мероприятий программы well-being при ежеквартальном мониторинге достигаемых результатов, оценке отклонений от плана и реформировании портфеля мероприятий на основе новых данных позволяет повысить точность принимаемых ответственными лицами решений и, тем самым, планомерно повышать эффективность сотрудников организации.

Таким образом, данная работа основана на теоретической базе ранее проведенных исследований, но при этом решает иную задачу с использованием математического аппарата. Необходимость раз-

работки новых инструментов обусловлена существующей тенденцией, которая, с одной стороны, направлена на улучшение управления финансовыми ресурсами компании, а с другой – на ее постоянное развитие и создание конкурентных преимуществ, обеспечивающих достаточную долю рынка для успешного существования в условиях растущей конкуренции.

Апробация модели на реальных бизнес-юнитах коммерческой компании позволила сформировать портфель мероприятий программы well-being в зависимости от приоритизации направлений менеджментом организации. Анализ различных сценариев определения приоритетности направлений в совокупности позволил выявить наиболее важные из них, которые оказывают наибольшее влияние на развитие компетенций сотрудников и снижение их уровня выгорания, а следовательно, и на общую эффективность работы организации. Достоверность полученных результатов подтверждается экспертами в области управления эффективностью персонала организаций, которые приняли участие в опросе и исследовании. Исходя из вышесказанного, можно заключить, что предложенный метод представляет собой функциональный инструмент, который позволяет сформировать оптимальный портфель мероприятий корпоративной программы well-being на основе начальных параметров в рамках организации. Следовательно, можно считать, что сформированная гипотеза является подтвержденной.

Заключение

В рамках данного исследования предложен нечеткий метод формирования оптимального портфеля мероприятий корпоративной программы well-being для максимально возможного продвижения по достижению целевых значений КПЭ сотрудников за счет развития их компетентности и снижения выгорания.

Метод учитывает недостатки, выявленные в рамках анализа научной литературы, и предлагает возможные решения: учтены эффекты от многопериодности процесса реализации программы well-being; рассмотрены оптимизационные аспекты при формировании портфеля мероприятий программы well-being; учтено наличие неопределенностей и рисков, связанных с субъективностью входных параметров; рассмотрено комплексное влияние компетентности и выгорания сотрудника на результативность и эффективность его работы.

В данной работе построена нечеткая динамическая модель формирования оптимального портфеля мероприятий программы well-being. Целевой функцией модели является интегральный показатель, характеризующий степень достижения целевых значений КПЭ сотрудников с учетом важности каждого из них для организации.

В качестве переменных оптимизации выступают бинарные переменные, которые определяют включение определенного мероприятия в программу well-being организации в конкретный момент времени в рамках заданного периода планирования.

В модели используются три типа ограничений:

- 1) суммарный объем инвестиций, направляемых на реализацию программы well-being, ограничен имеющимся бюджетом организации;
- 2) допустимая сумма финансовых средств, инвестируемых в то или иное направление программы well-being, ограничена сверху задаваемым нечетким числом;
- 3) прирост интегрального показателя компетентности каждого сотрудника за счет инвестиций в программу well-being не превосходит заданной нечеткой величины.

Особенностями модели являются:

во-первых, использование в ее основе функциональных зависимостей каналов влияния (между категориями интегральных показателей ожиданий, компетенций, уровней выгорания и КПЭ), найденных дефазификацией нечетких кусочно-постоянных регрессий, которые построены на основе матриц соответствия между нечеткими категориями интегральных показателей;

во-вторых, задание набора входных параметров ограничений модели в виде нечетких чисел, что позволяет за счет задания их уровня достоверности сделать ограничения либо более жесткими, либо более мягкими.

Использование нечеткого подхода позволяет учесть наличие неопределенностей и рисков, связанных с использованием методов сбора субъективных начальных данных, являющихся важной составляющей при построении модели.

Предложенный метод обладает теоретической значимостью, т.к. представляет собой инструмент формирования оптимального портфеля мероприятий корпоративной программы well-being в разрезе сотрудников и моментов времени, что, в свою очередь, позволяет определять структуру распределения финансовых средств в различные направления программы для повышения результативности и эффективности работы сотрудников и организации в целом.

Полученные результаты подтверждают выдвинутую в данном исследовании гипотезу.

Практической ценностью исследования является предоставление лицам, ответственным за реализацию процессов управления эффективностью и общим состоянием сотрудников в организации, инструментального аппарата определения и формирования обоснованного портфеля мероприятий корпоративной программы well-being, оказывающего влияние на производительность труда сотрудников.

В дальнейшем планируется проведение глубинного исследования по количественной оценке рисков отклонения на горизонте планирования фактического продвижения по достижению целевых значений КПЭ сотрудников от прогнозируемых на основе формирования оптимальной программы well-being. ■

Благодарности

Исследование выполнено во Владивостокском государственном университете за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-01333¹.

Литература

1. Mazelis L., Lavrenyuk K., Grenkin G., Krasko A. Conceptual model for the development of employee competencies through the well-being implementation // International Journal of Sustainable Development & Planning. 2023. Vol. 18. No. 11. P. 3557–3566. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.181120>
2. Zeyi L., Jiayin H. Key factors for sustainability – corporate culture and employee well-being // Advances in Economics, Management and Political Sciences. 2024. Vol. 78. P. 263–267. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/78/20241734>
3. Gonsiorowska M., Zieba M. Employee well-being and its potential link with human knowledge risks // 24th European Conference on Knowledge Management. 2023. P. 430–436. <https://doi.org/10.34190/eckm.24.1.1578>

¹ <https://rscf.ru/project/23-28-01333/>

4. Salman M., Saleem I., Ganie S.A. Human resource management practices as antecedents of employee competencies: Empirical evidence from the banking industry // *Management and Labour Studies*. 2023. Vol. 3. No. 48. P. 381–398. <https://doi.org/10.1177/0258042X221138362>
5. Rudyk O., Maksymova J., Zaletska I. The importance of developing the professional competences of the staff of service sector enterprises // *Market Economy Modern Management Theory and Practice*. 2023. Vol. 21. No. 3. P. 461–475. [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3\(52\).275826](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3(52).275826)
6. Loyalka P., Huang X., Zhang L., Wei J., Yi H., Song Y., Shi Y., Chu J. The impact of vocational schooling on human capital development in developing countries: Evidence from China // *The World Bank Economic Review*. 2015. Vol. 30. No. 1. P. 143–170. <https://doi.org/10.1093/wber/lhv050>
7. Mathibe M.S., Chinyamurindi W.T. Determinants of employee mental health in the South African public service: The role of organizational citizenship behaviors and workplace social support // *Advances in Mental Health*. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 306–316. <https://doi.org/10.1080/18387357.2021.1938153>
8. Nursel A.M. The relationship between employee well-being, burnout and perceived organizational support in healthcare professionals // *Journal of International Health Sciences and Management*. 2020. Vol. 6. No. 12. P. 34–39. <https://doi.org/10.48121/jihsam.788565>
9. Konieczny G., Kolisnichenko P., Górska M., Górski T. The role of well-being in sustainable corporate development of companies // *Economics, Finance and Management Review*. 2023. Vol. 15. No. 3. P. 59–67. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2023-3-59-67>
10. Bes I., Shoman Y., Al-Gobari M., Rousson V., Guseva Canu I. Organizational interventions and occupational burnout: a meta-analysis with focus on exhaustion // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2023. Vol. 9. No. 96. P. 1211–1223. <https://doi.org/10.1007/s00420-023-02009-z>
11. Генкин Е.В., Озеров С.Л., Сатина А.В. Внедрение программы WELL-BEING для поддержания эмоционального и психологического состояния работников компании // *Нормирование и оплата труда в промышленности*. 2022. № 2. <https://doi.org/10.33920/pro-3-2202-03>
12. Коновалова В.Г. Опыт, тенденции развития и проблемы реализации корпоративных программ управления здоровьем и благополучием персонала // *Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России*. 2018. Т. 7. № 5. С. 19–29. https://doi.org/10.12737/article_5bd1c6797f9068.21933673
13. Rong C. The impact of employees' health and well-being on job performance // *Journal of Education, Humanities and Social Sciences*. 2024. Vol. 29. P. 372–378. <https://doi.org/10.54097/9ft7db35>
14. Naczenski L.M., de Vries J.D., van Hooff M.L.M., Kompier M.A.J. Systematic review of the association between physical activity and burnout // *Journal of Occupational Health*. 2017. Vol. 59. No. 6. P. 477–494. <https://doi.org/10.1539/joh.17-0050-RA>
15. Shih S.-P., Jiang J.J., Klein G., Wang E. Job burnout of the information technology worker: Work exhaustion, depersonalization, and personal accomplishment // *Information & Management*. 2013. Vol. 50. No. 7. P. 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.im.2013.08.003>
16. Diamantidis A.D., Chatzoglou P. Factors affecting employee performance: An empirical approach // *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2019. Vol. 68. No. 1. P. 171–193. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2018-0012>
17. Otoo F.N.K., Mishra M. Measuring the impact of human resource development (HRD) practices on employee performance in small and medium scale enterprises // *European Journal of Training and Development*. 2018. Vol. 42. Nos. 7/8. P. 517–534. <https://doi.org/10.1108/EJTD-07-2017-0061>
18. Kurniawan A., Sanosra A., Qomariah N. Efforts to increase motivation and performance based on employee competency and job characteristics // *Journal of Economics, Finance and Management Studies*. 2023. Vol. 6. No. 7. P. 3153–3162. <https://doi.org/10.47191/jefms/v6-i7-17>
19. Ateke B.W., Nwulu C.S. Employee competency development and organizational resilience // *International Journal of Social Sciences and Management Research*. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 31–44.
20. Dharmanegara I.B.A., Sitiari N.W., Wirayudha I.D.G.N. Job competency and work environment: the effect on job satisfaction and job performance among SMEs worker // *IOSR Journal of Business and Management*. 2016. Vol. 18. No. 1. P. 19–26. <http://doi.org/10.9790/487X-18121926>
21. Sitopu Y.B., Sitingjak K.A., Marpaung F.K. The influence of motivation, work discipline, and compensation on employee performance // *Golden Ratio of Human Resource Management*. 2021. Vol. 2. No. 1. P. 72–83. <https://doi.org/10.52970/grhrm.v1i2.79>
22. Kim J., Jung H.-S. The effect of employee competency and organizational culture on employees' perceived stress for better workplace // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. No. 8. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084428>
23. Matani M., Bidmeshki G.A. The role of burnout on reducing employees' performance // *Journal of Management and Accounting Studies*. 2020. Vol. 6. No. 2. P. 39–46. <https://doi.org/10.24200/jmas.vol6iss02pp39-46>
24. Trees Bolt E.E., Homer S.T. Employee corporate social responsibility and well-being: The role of work, family and culture spillover // *Employee Relations: The International Journal*. 2023. Vol. 46. No. 7. <https://doi.org/10.1108/ER-02-2023-0097>
25. Kristiana Y., Sijabat R., Sudibjo N., Bernarto I. Hotel employee well-being: The role of job crafting and work engagement // *International Journal of Religion*. 2024. Vol. 5. No. 7. P. 200–211. <https://doi.org/10.61707/az74f509>
26. Saleh R. The effect of motivation factors on employee performance: Performance appraisal using data mining // *Journal of Business Theory and Practice*. 2023. Vol. 11. No. 1. P. 43–58. <https://doi.org/10.22158/jbtp.v11n1p43>
27. Ozcelik H., Langton N., Aldrich H. Doing well and doing good: The relationship between leadership practices that facilitate a positive emotional climate and organizational performance // *Journal of Managerial Psychology*. 2008. Vol. 23. No. 2. P. 186–203. <https://doi.org/10.1108/02683940810850817>

28. Fastje F., Mesmer-Magnus J., Guidice R., Andrews M.C. Employee burnout: The dark side of performance-driven work climates // *Journal of Organizational Effectiveness: People and Performance*. 2023. Vol. 10. No. 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1108/JOEPP-10-2021-0274>
29. Rony Z., Pardosi H.D. Burnout digital monitoring on employee engagement at the company // *International Journal of Research in Business and Social Science*. 2021. Vol. 10. No. 7. P. 156–162. <https://doi.org/10.20525/ijrbs.v10i7.1412>
30. Williams H.P. *Model building in mathematical programming*, 5th Edition. Wiley, 2013.
31. Ammar E., Khalifa H.A. Fuzzy portfolio optimization a quadratic programming approach // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2003. Vol. 18. No. 5. P. 1045–1054. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00071-7](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00071-7)
32. Akopov A.S. Parallel genetic algorithm with fading selection // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2014. Vol. 49. Nos. 3/4. P. 325–331. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.062368>
33. Mazelis L., Solodukhin K., Tarantaev A. Fuzzy optimization models for project portfolio rolling planning taking into account risk and stakeholder interests // *The Journal of Social Sciences Research*. 2018. No. 3. P. 201–210. <https://doi.org/10.32861/jssr.spi3.201.210>
34. Мазелис Л.С., Лавренюк К.И., Гренкин Г.В. Анализ зависимости между ожиданиями сотрудников от корпоративной среды компании и их выгоранием // *Journal of Applied Economic Research*. 2023. Т. 22. № 4. С. 1034–1055. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.4.040>
35. Мазелис Л.С., Гренкин Г.В., Лавренюк К.И., Красько А.А. Нечеткий метод оценки влияния компетенций и выгорания сотрудников на достижение ими ключевых показателей эффективности // *Гибридные и синергетические интеллектуальные системы. Сборник статей по материалам научной VII Всероссийской Поспеловской конференции*. Калининград, Санкт-Петербург. 2024. С. 411–422.
36. Мазелис Л.С., Лавренюк К.И., Красько А.А. Моделирование развитие компетентности сотрудников за счет инвестирования в мероприятия программы well-being // *Проблемы рыночной экономики*. 2023. № 3. С. 53–67. <http://doi.org/10.33051/2500-2325-2023-3-53-67>
37. Аньшин В.М., Демкин И.В., Никонов И.М., Царьков И.Н. *Модели управления портфелем проектов в условиях неопределенности*. М.: МАТИ, 2008.
38. Wang J., Hwang W.-L. A fuzzy set approach for R&D portfolio selection using a real options valuation model // *Omega*. 2007. Vol. 35. No. 3. P. 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.06.002>

Об авторах

Мазелис Лев Соломонович

доктор экономических наук;

профессор, кафедра математики и моделирования, Владивостокский государственный университет, Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41;

E-mail: lev.mazelis@vvsu.ru

ORCID: 0000-0001-7346-3960

Гренкин Глеб Владимирович

кандидат физико-математических наук;

доцент, кафедра математики и моделирования, Владивостокский государственный университет, Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41;

E-mail: gleb.grenkin@vvsu.ru

ORCID: 0000-0002-1307-3757

Лавренюк Кирилл Игоревич

руководитель проектов, ООО «Яндекс», Россия, 119021, г. Москва, ул. Льва Толстого, д. 16;

E-mail: kirlavrenyuk@yandex-team.ru

ORCID: 0000-0002-9092-3196

Красько Андрей Александрович

кандидат экономических наук;

доцент, кафедра математики и моделирования, Владивостокский государственный университет, Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41;

E-mail: andrey.krasko@vvsu.ru

ORCID: 0000-0002-6136-6893

Development of a fuzzy optimization model for the formation of a portfolio of well-being program activities to increase employee productivity

Lev S. Mazelis^a

E-mail: lev.mazelis@vvsu.ru

Gleb V. Grenkin^a

E-mail: gleb.grenkin@vvsu.ru

Kirill I. Lavrenyuk^b

E-mail: kir.lavrenyuk@mail.ru

Andrey A. Krasko^a

E-mail: andrey.krasko@vvsu.ru

^a Vladivostok State University, Vladivostok, Russia

^b Yandex, Moscow, Russia

Abstract

This study was conducted within the framework of the urgent task of studying the processes of developing the human capital of an organization and increasing employee productivity. At the same time, the development process is viewed through the prism of creating and implementing various elements of the well-being program into the main corporate business processes of the organization. The purpose of this work is to develop a fuzzy method for forming an optimal portfolio of well-being program activities which will allow you to get as close as possible to the target values of key performance indicators (KPIs) of employees on a given planning horizon. To achieve this goal, a hypothesis is put forward about the possibility of building a tool that allows, based on the functional dependencies of influence channels, to form an optimal portfolio of well-being program activities that increases the efficiency of the organization. The method developed consists of a model representing a fuzzy programming problem and a method for finding its solution. A distinctive feature of the model is the consideration of two levels of uncertainty in the formation of an optimal portfolio of activities related to the reliability of estimates of numerical coefficients of functional dependencies of channels of influence and a set of parameters of constraints determined by experts. An integral indicator is used as the target function of the model, which characterizes the degree to which the target values of key employee performance indicators are achieved, taking into account the importance of each of them for the organization. The optimization variables in the model are binary variables that determine the inclusion of a certain event in the well-being program of an organization at a specific time within a given planning period. The limitations in the model are: the total amount of financial resources allocated for the implementation of the well-being program; the amount of investment in a specific area of the well-being program; an increase in the integral indicator of competence of each employee. From a practical point of view, the proposed method will make it possible to form a well-founded portfolio of well-being program activities, the implementation of which has the maximum possible positive impact on employee productivity.

Keywords: well-being program, employee burnout, competence development, portfolio optimization, fuzzy approach

Citation: Mazelis L.S., Grenkin G.V., Lavrenyuk K.I., Krasko A.A. (2025) Development of a fuzzy optimization model for the formation of a portfolio of well-being program activities to increase employee productivity. *Business Informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 50–71. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.50.71

References

1. Mazelis L., Lavrenyuk K., Grenkin G., Krasko A. (2023) Conceptual model for the development of employee competencies through the well-being implementation. *International Journal of Sustainable Development & Planning*, vol. 18, no. 11, pp. 3557–3566. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.181120>
2. Zeyi L., Jiayin H. (2024) Key factors for sustainability – corporate culture and employee well-being. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, vol. 78, pp. 263–267. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/78/20241734>
3. Gonsiorowska M., Zieba M. (2023) Employee well-being and its potential link with human knowledge risks. *24th European Conference on Knowledge Management*, pp. 430–436. <https://doi.org/10.34190/eckm.24.1.1578>
4. Salman M., Saleem I., Ganie S.A. (2023) Human resource management practices as antecedents of employee competencies: Empirical evidence from the banking industry. *Management and Labour Studies*, vol. 3, no. 48, pp. 381–398. <https://doi.org/10.1177/0258042X221138362>
5. Rudyk O., Maksymova J., Zaletska I. (2023) The importance of developing the professional competences of the staff of ser-vic sector enterprises. *Market Economy Modern Management Theory and Practice*, vol. 21, no. 3, pp. 461–475. [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3\(52\).275826](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3(52).275826)
6. Loyalka P., Huang X., Zhang L., et al. (2015) The impact of vocational schooling on human capital development in developing countries: Evidence from China. *The World Bank Economic Review*, vol. 30, no. 1, pp. 143–170. <https://doi.org/10.1093/wber/lhv050>
7. Mathibe M.S., Chinyamurindi W.T. (2021) Determinants of employee mental health in the South African public service: The role of organizational citizenship behaviors and workplace social support. *Advances in Mental Health*, vol. 19, no. 3, pp. 306–316. <https://doi.org/10.1080/18387357.2021.1938153>
8. Nursel A.M. (2020) The relationship between employee well-being, burnout and perceived organizational support in healthcare professionals. *Journal of International Health Sciences and Management*, vol. 6, no. 12, pp. 34–39. <https://doi.org/10.48121/jihmsam.788565>
9. Konieczny G., Kolisnichenko P., Górska M., Górski T. (2023) The role of well-being in sustainable corporate development of companies. *Economics, Finance and Management Review*, vol. 15, no. 3, pp. 59–67. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2023-3-59-67>
10. Bes I., Shoman Y., Al-Gobari M., et al. (2023) Organizational interventions and occupational burnout: a meta-analysis with focus on exhaustion. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 9, no. 96, pp. 1211–1223. <https://doi.org/10.1007/s00420-023-02009-z>
11. Genkin E.V., Ozerov S.L., Satina A.V. (2022) Implementation of the WELL-BEING program to maintain the emotional and psychological state of the company’s employees. *Normirovaniye i Oplata Truda v Promyshlennosti (Labor Norming and Remuneration in Industrial Sector)*, no. 2 (in Russian). <https://doi.org/10.33920/pro-3-2202-03>
12. Konovalova V.G. (2018) Experience, development trends and problems of implementing corporate employee health and well-being programs. *Management of the Personnel and Intellectual Resources in Russia*, vol. 7, no. 5, pp. 19–29 (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5bd1c6797f9068.21933673
13. Rong C. (2024) The impact of employees’ health and well-being on job performance. *Journal of Education, Humanities and Social Sciences*, vol. 29, pp. 372–378. <https://doi.org/10.54097/9ft7db35>
14. Naczenski L.M., de Vries J.D., van Hooff M.L.M., Kompier M.A.J. (2017) Systematic review of the association between physical activity and burnout. *Journal of Occupational Health*, vol. 59, no. 6, pp. 477–494. <https://doi.org/10.1539/joh.17-0050-RA>
15. Shih S.-P., Jiang J.J., Klein G., Wang E. (2013) Job burnout of the information technology worker: Work exhaustion, depersonalization, and personal accomplishment. *Information & Management*, vol. 50, no. 7, pp. 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.im.2013.08.003>
16. Diamantidis A.D., Chatzoglou P. (2019) Factors affecting employee performance: An empirical approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 68, no. 1, pp. 171–193. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2018-0012>
17. Otoo F.N.K., Mishra M. (2018) Measuring the impact of human resource development (HRD) practices on employee performance in small and medium scale enterprises. *European Journal of Training and Development*, vol. 42, nos. 7/8, pp. 517–534. <https://doi.org/10.1108/EJTD-07-2017-0061>
18. Kurniawan A., Sanosra A., Qomariah N. (2023) Efforts to increase motivation and performance based on employee competency and job characteristics. *Journal of Economics, Finance and Management Studies*, vol. 6, no. 7, pp. 3153–3162. <https://doi.org/10.47191/jefms/v6-i7-18>

19. Ateke B.W., Nwulu C.S. (2018) Employee competency development and organizational resilience. *International Journal of Social Sciences and Management Research*, vol. 4, no. 3, pp. 31–44.
20. Dharmanegara I.B.A., Sitiari N.W., Wirayudha I.D.G.N. (2016) Job competency and work environment: the effect on job satisfaction and job performance among SMEs worker. *IOSR Journal of Business and Management*, vol. 18, no. 1, pp. 19–26. <http://doi.org/10.9790/487X-18121926>
21. Sitopu Y.B., Sitinjak K.A., Marpaung F.K. (2021) The influence of motivation, work discipline, and compensation on employee performance. *Golden Ratio of Human Resource Management*, vol. 2, no. 1, pp. 72–83. <https://doi.org/10.52970/grhrm.v1i2.79>
22. Kim J., Jung H.-S. (2022) The effect of employee competency and organizational culture on employees' perceived stress for better workplace. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 8. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084428>
23. Matani M., Bidmeshki G.A. (2020) The role of burnout on reducing employees' performance. *Journal of Management and Accounting Studies*, vol. 6, no. 2, pp. 39–46. <https://doi.org/10.24200/jmas.vol6iss02pp39-46>
24. Trees Bolt E.E., Homer S.T. (2023) Employee corporate social responsibility and well-being: The role of work, family and culture spillover. *Employee Relations: The International Journal*, vol. 46, no. 7. <https://doi.org/10.1108/ER-02-2023-0097>
25. Kristiana Y., Sijabat R., Sudibjo N., Bernarto I. (2024) Hotel employee well-being: The role of job crafting and work engagement. *International Journal of Religion*, vol. 5, no. 7, pp. 200–211. <https://doi.org/10.61707/az74f509>
26. Saleh R. (2023) The effect of motivation factors on employee performance: Performance appraisal using data mining. *Journal of Business Theory and Practice*, vol. 11, no. 1, pp. 43–58. <https://doi.org/10.22158/jbtp.v11n1p43>
27. Ozcelik H., Langton N., Aldrich H. (2008) Doing well and doing good: The relationship between leadership practices that facilitate a positive emotional climate and organizational performance. *Journal of Managerial Psychology*, vol. 23, no. 2, pp. 186–203. <https://doi.org/10.1108/02683940810850817>
28. Fastje F., Mesmer-Magnus J., Guidice R., Andrews M.C. (2023) Employee burnout: The dark side of performance-driven work climates. *Journal of Organizational Effectiveness: People and Performance*, vol. 10, no. 1, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1108/JOEPP-10-2021-0274>
29. Rony Z., Pardosi H.D. (2021) Burnout digital monitoring on employee engagement at the company. *International Journal of Research in Business and Social Science*, vol. 10, no. 7, pp. 156–162. <https://doi.org/10.20525/ijrbs.v10i7.1412>
30. Williams H.P. (2013) *Model building in mathematical programming, 5th Edition*. Wiley.
31. Ammar E., Khalifa H.A. (2003) Fuzzy portfolio optimization a quadratic programming approach. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 18, no. 5, pp. 1045–1054. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00071-7](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00071-7)
32. Akopov A.S. (2014) Parallel genetic algorithm with fading selection. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 49, nos. 3/4, pp. 325–331. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.062368>
33. Mazelis L., Solodukhin K., Tarantaev A. (2018) Fuzzy optimization models for project portfolio rolling planning taking into account risk and stakeholder interests. *The Journal of Social Sciences Research*, no. 3, pp. 201–210. <https://doi.org/10.32861/jssr.spi3.201.210>
34. Mazelis L.S., Lavreniuk K.I., Grenkin G.V. (2023) Analysis of the Relation Between Expectation of Employees from Corporate Environment and their Burnout. *Journal of Applied Economic Research*, vol. 22, no. 4, pp. 1034–1055 (in Russian). <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.4.040>
35. Mazelis L.S., Grenkin G.V., Lavreniuk K.I., Krasko A.A. (2024) Fuzzy method for assessing the impact of employee competencies and burnout on their achievement of key performance indicators. *Gibridnye i sinergeticheskie intellektualnye sistemy (Hybrid and synergistic intelligent systems). Collection of articles from the materials of the VII All-Russian Pospel Conference. Kaliningrad, St. Petersburg*, pp. 411–422 (in Russian).
36. Mazelis L.S., Lavreniuk K.I., Krasko A.A. (2023) Modeling the development of employee competence by investing in well-being program activities. *Market Economy Problems*, no. 3, pp. 53–67 (in Russian). <http://doi.org/10.33051/2500-2325-2023-3-53-67>
37. Anshin V.M., Demkin I.V., Nikonov I.M., Tsarkov I.N. (2008) *Models of project portfolio management under uncertainty*. Moscow: Moscow State Aviation Technological University (in Russian).
38. Wang J., Hwang W.-L. (2007) A fuzzy set approach for R&D portfolio selection using a real options valuation model. *Omega*, vol. 35, no. 3, pp. 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.06.002>

About the authors

Lev S. Mazelis

Doctor of Sciences (Economics);

Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41, Gogol St., Vladivostok 690014, Russia;

E-mail: lev.mazelis@vvsu.ru

ORCID: 0000-0001-7346-3960

Gleb V. Grenkin

Candidate of Sciences (Physics and Mathematics);

Associate Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41, Gogol St., Vladivostok 690014, Russia;

E-mail: gleb.grenkin@vvsu.ru

ORCID: 0000-0002-1307-3757

Kirill I. Lavrenyuk

Project Manager, Yandex, 16, Lva Tolstogo St., Moscow 119021, Russia;

E-mail: kirlavrenyuk@yandex-team.ru

ORCID: 0000-0002-9092-3196

Andrey A. Krasko

Candidate of Sciences (Economics);

Associate Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41, Gogol St., Vladivostok 690014, Russia;

E-mail: andrey.krasko@vvsu.ru

ORCID: 0000-0002-6136-6893

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.72.92

Оценка рисков недостижения целевых значений показателей интеллектуального капитала организации на основе нечеткой модели

К.С. Солодухин* 

E-mail: k.solodukhin@mail.ru

Г.С. Завалин 

E-mail: georgiy.zavalin08@vvsu.ru

Д.В. Макарова 

E-mail: malnova.daria@vvsu.ru

Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия

Аннотация

Процессы формирования и развития интеллектуального капитала в цифровой экономике представляют собой слабоструктурированные процессы, протекающие в условиях значительно-го увеличения скорости и непредсказуемости изменений во внешней среде. Это крайне затрудняет возможность использования предыдущего опыта и вероятностных прогнозов при оценке рисков недостижения стратегических целей по развитию интеллектуального капитала организации. При этом нежелательные отклонения при достижении этих целей могут приводить к значительным негативным последствиям. В этой связи возникает необходимость разработки соответствующих нечетких методов и моделей, что обуславливает актуальность настоящей работы. Цель данного исследования состояла в разработке нечеткого метода оценки рисков недостижения стратегических целей организации в сфере развития интеллектуального капитала. В основе метода лежит разработанная авторами нечеткая модель, позволяющая учитывать толерантность к неопределенности лица, принимающего решения. Апробация метода на примере конкретной

* Автор, ответственный за переписку

организации показала возможность его практической применимости. Приведены количественные оценки и качественные интерпретации уровней рисков недостижения целевых показателей по развитию интеллектуального капитала организации (крупного регионального университета).

Ключевые слова: интеллектуальный капитал, нечеткая модель, риски недостижения целей, управление рисками портфеля проектов, толерантность к неопределенности

Цитирование: Солодухин К.С., Завалин Г.С., Макарова Д.В. Оценка рисков недостижения целевых значений показателей интеллектуального капитала организации на основе нечеткой модели // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 1. С. 72–92. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.72.92

Введение

Формирование и реализация стратегических целей являются ядром стратегического процесса в организации [1, 2]. Другими важнейшими признаками стратегического процесса являются стратегическая рефлексия (поиск лучших путей достижения целей) и стратегические действия (реализация программ, проектов, мероприятий) [3].

Стратегический процесс (как и любая другая деятельность хозяйствующего субъекта) осуществляется в условиях неопределенностей, наличие которых приводит к рискам недостижения целей.

В системе стратегических целей организации могут быть цели, требующие безусловного выполнения. Недостижение этих целей может привести к прекращению ее существования. В этой связи точность оценки рисков недостижения таких целей приобретает критическое значение [4]. Наличие рисков недостижения цели требует запаса «омертвленных» («страховых») ресурсов, использование которых предполагается в случае возникновения угроз на пути движения к цели [5]. Повышение точности оценки рисков позволит избежать излишнего «замораживания» ресурсов.

Неточность оценки рисков недостижения целей может также привести к излишним затратам ресурсов, заложенным на этапе планирования стратегических действий (формирования планов и программ развития, отбора проектов). В свою очередь, это может привести к перевыполнению некоторых целей с соответствующими негативными последствиями [6].

С позиций операциональной теории управления риском уровень риска отклонения от целей организации можно считать характеристикой качества управления. В рамках теории экономического риска рассматривается как категория, отражающая меру реальности нежелательного отклонения от целей и величину обусловленных этим отклонением потерь. При этом оценка меры отклонения может быть осуществлена, например, в виде дополнительных затрат или снижения экономического эффекта, обусловленных реализацией управленческого решения [7].

В теории управления экономическим риском анализ и сопоставление информации о хозяйственной ситуации может происходить в двух различных ситуациях (временных срезах): на этапе подготовки решения и на этапе реализации решения [7].

Для второго этапа методы оценки рисков недостижения целей посвящены идентификации и оценке возможных помех – событий во внешней среде, препятствующих достижению целей. В зависимости от способа оценки помех модели могут быть вероятностными [8–13] или нечеткими [14–18]. Существуют также модели, в которых нечеткий подход дополнен вероятностным анализом [19].

На первом этапе происходит генерация вариантов решений (управленческих воздействий), оценивается достаточность (для принятия решений) имеющейся информации, исходная информация пополняется и уточняется, прогнозируются результаты применения выбранных решений и их соответствие поставленным целям [7].

Управленческим решением (вариантом решения) является решение о выборе из множества возможных стратегических мероприятий (за каждым из которых стоят необходимые ресурсы и определенные последствия) некоторой конкретной совокупности мероприятий, направленных на достижение целей [20]. В большинстве случаев стратегические мероприятия могут быть рассмотрены как проекты (реконструкции и развития), соответственно, выбор совокупности мероприятий представляет собой формирование портфеля проектов.

Управление рисками портфеля проектов (Project Portfolio Risk Management, PPRM) представляет собой сформировавшуюся область исследований, в фокусе внимания которой находятся процессы выявления и балансировки рисков портфеля проектов при стремлении максимизировать ценность, получаемую компанией, что отражается в достигнутом воздействии на стратегические цели [21]. Таким образом, в фокусе внимания PPRM находятся управленческие возможности организации по снижению негативного воздействия рисков и расширению возможностей с учетом взаимозависимостей между проектами и рисками [22–25].

В PPRM могут быть выделены как уже сложившиеся, так и перспективные направления исследований [21]. Одним из таких направлений является развитие моделей и методов оценки рисков портфеля проектов (Project Portfolio Risk, PPR).

В основе существующих методов оценки портфельного риска лежат различные подходы к моделированию неопределенности. В стохастических моделях неопределенность описывается распределением вероятностей. В нечетких моделях – функцией принадлежности [26]. В нестохастических игровых моделях задается неструктурированное множество потенциально возможных значений элементарного события [7].

Теория управления риском смещает акцент в сторону исследования слабоструктурированных явлений [7]. В настоящее время эти явления происходят в условиях значительного увеличения скорости и непредсказуемости изменений во внешней среде. Это крайне затрудняет возможность использования предыдущего опыта (исторических данных) [27] и вероятностных прогнозов.

В этой связи в последние годы активно разрабатываются самые различные нечеткие модели, позволяющие оценить риски портфеля проектов и учесть

полученные оценки рисков при выборе портфеля. Следует отметить работу В. Мохавеги с соавторами [28], предложившими оригинальный подход к выбору оптимального портфеля проектов по достижению целей устойчивого развития с использованием интервальных нечетких множеств для учета неопределенности и различных критериев (индексов), отражающих риски. В работе О.М. Шаталовой [29] предложены нечеткие модели оценки сравнительной эффективности инновационных проектов при формировании программы технологического развития промышленного предприятия в условиях нестохастической неопределенности с учетом рисков. В работе А. Зайдуни с соавторами [30] для прогнозирования рисков портфеля ИТ-проектов используется нечеткий факторный анализ. Следует также отметить работы М.К. Мехлавата и др. [31], Р. Ханджани Шираза и др. [32], Х. Денга и Ю. Юаня [33], М. Рахимнежада Галанкаши и др. [34], М. Мохсени-Тонекабони и др. [35], Б. Ванга и др. [36], Ф. Дехгани [37], В.Д. Нгуена и др. [38], С.Х. Абтахи [39], Х. Янга и др. [40].

В то же время, потенциал нечеткого подхода при анализе рисков портфеля проектов в полной мере не реализован [21].

Достижение стратегических целей приводит к изменению стратегического потенциала – «совокупности находящихся в распоряжении предприятия «стратегических» ресурсов, имеющих определяющее значение для возможностей и границ функционирования предприятия в тех или иных условиях» [41, с. 352]. В условиях развития цифровой экономики важнейшим стратегическим ресурсом организации является ее интеллектуальный капитал.

Стратегия развития интеллектуального капитала является частью общей стратегии развития организации. Совокупность стратегических целей, способствующих развитию интеллектуального капитала, является подмножеством множества всех стратегических целей организации. Нежелательные отклонения при достижении этих целей приводят к вышеописанным негативным последствиям. При этом, оценка рисков таких отклонений существенно сложнее, чем для большинства других стратегических целей в силу специфики интеллектуального капитала: большое количество имплицитных и «качественных» факторов развития, сильное динамическое воздействие компонентов интеллектуального капитала организации и др. [42, 43].

В этой связи на первый план выходят именно нечеткие модели оценки интеллектуального капитала организации и его компонентов. Значительное внимание таким моделям уделено в обзоре М. Коса с соавторами [44]. Из соответствующих публикаций, вышедших не ранее 2020 г., следует отметить работы А. Бустаманте и др. [45], С. Козловского и др. [46], Дж. Чевика и О. Арслана [47], Н. Покровской и др. [48], М. Луккезе и др. [49], Е. Гросс-Голацкой и др. [50].

В то же время, такой важный (по указанным выше причинам) вопрос, как оценка рисков недостижения целевых показателей интеллектуального капитала организации остался не затронут разработчиками моделей.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка нечеткого метода оценки рисков недостижения стратегических целей для поддержки принятия управленческих решений в сфере развития интеллектуального капитала организации.

Работа содержит четыре основных раздела. В первом разделе «Метод оценки рисков недостижения целевых показателей интеллектуального капитала организации» приведена базовая схема метода, описано содержание ее основных этапов. В основе предлагаемого метода лежит нечеткая модель, подробно изложенная во втором разделе статьи. В третьем разделе приведены результаты апробации метода на примере конкретной организации (крупного регионального университета). В разделе «Обсуждение» сформулированы преимущества метода; его вклад в развитие различных областей исследований; возможности и условия его использования для организаций различных типов и отраслевой принадлежности.

1. Метод оценки рисков недостижения целевых показателей интеллектуального капитала организации

Базовая схема предлагаемого метода оценки рисков недостижения стратегических целей по развитию интеллектуального капитала организации (далее – ИКО) приведена на *рисунке 1*.

Прежде всего, необходимо сформировать каузальное поле показателей развития ИКО по ранее предложенной схеме [51]. Выделение эксплицитных и имплицитных факторов, находящихся на нижнем уровне иерархии, и оценка их влияния базируются на основе авторской нечеткой модели. Пример ие-

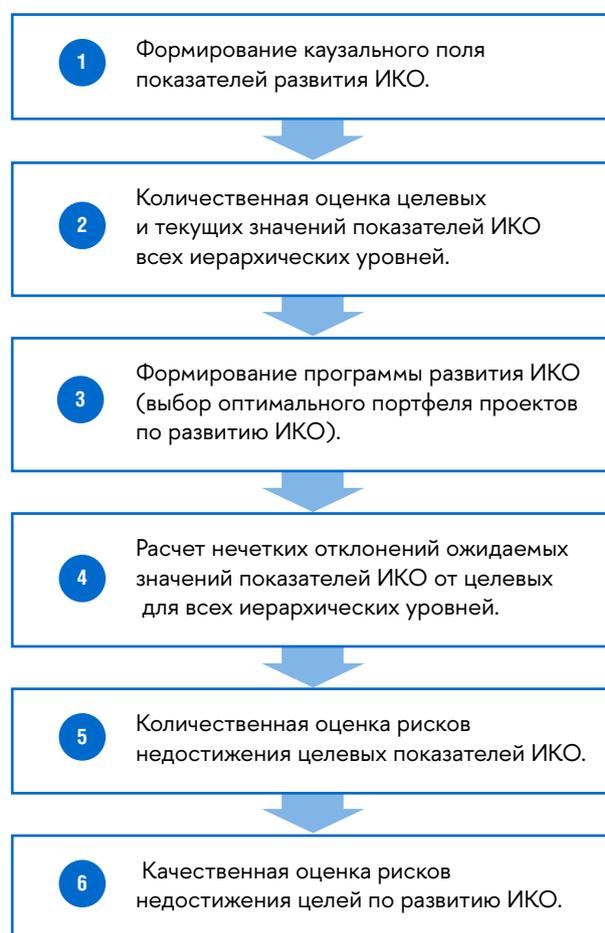


Рис. 1. Базовая схема метода оценки рисков недостижения целей организации по развитию интеллектуального капитала.

рархической структуры показателей развития ИКО для конкретной организации (университета) приведен в разделе 3 (*рисунок 2*) [52, 53].

Часть показателей ИКО нижнего уровня иерархии естественным образом оценивается в количественных шкалах. Другая часть (а также практически все показатели вышележащих уровней) оцениваются в качественных шкалах. Соответственно, возникают существенные сложности в процессе движения по иерархии снизу-вверх при оценке интегральных показателей ИКО вплоть до интегрального показателя интеллектуального капитала организации в целом. Еще одна сложность при оценке показателей развития ИКО связана возникновением циклов в иерархии. В этой связи была предложена нечеткая модель, позволяющая количественно оценить показатели развития ИКО на всех иерархических уровнях [52].

Данная модель разрабатывалась для оценки текущего уровня ИКО. При этом она может успешно использоваться при установлении целевых значений показателей развития ИКО. Стратегические цели в области развития ИКО возникают в рамках общей стратегии организации, формализованной на основе модифицированной сбалансированной системы показателей [51]. Соответственно, как правило, известны четкие целевые значения «количественных» результирующих показателей таких целей. Значения «качественных» результирующих показателей зачастую отсутствуют в явном виде в стратегии. А в том случае, если они все-таки каким-то образом установлены, непонятно, как определять целевые значения различных интегральных показателей развития ИКО (соответствующих основным компонентам ИКО, способностям организации к тем или иным когнитивным активностям и различным аспектам в рамках отдельных типов когнитивных активностей). Для этого и может быть применена данная модель.

После того, как количественно определены нечеткие целевые и текущие значения всех показателей в иерархии, может быть сформирована программа стратегического развития ИКО. Данная программа представляет собой совокупность стратегических мероприятий (проектов), в результате осуществления которых происходит достижение (в той или иной степени) стратегических целей по развитию ИКО. Таким образом, значения результирующих показателей этих целей (показателей развития ИКО) достигают целевых значений или приближаются к ним.

В работе [53] предложены нечеткие оптимизационные модели формирования портфеля проектов по развитию ИКО с учетом рисков. Нечеткие оптимизационные задачи сводятся к четким задачам булева квадратичного программирования с помощью методов, предложенных в работах [54–56]. При этом необходимо задать уровни достоверности для целевой функции и каждого ограничения. Уровни достоверности задают жесткость ограничений и могут влиять на состав портфеля. Можно считать, что заданные уровни достоверности определяют толерантность к неопределенности лица, принимающего решение (ЛПР) [57].

Предложенные модели позволяют сформировать оптимальный портфель проектов по развитию ИКО (в зависимости от выбранной целевой функции и заданных ограничений). Одновременно с этим мы получаем ожидаемые нечеткие значения всех пока-

зателей ИКО в иерархии (при реализации данного портфеля). Соответственно, могут быть рассчитаны нечеткие относительные отклонения ожидаемых значений от целевых (степени недостижения целевых показателей).

Данные отклонения отражают риски недостижения целевых показателей развития ИКО. В свою очередь, может быть получена дополнительная количественная информация для удобства и повышения точности качественной интерпретации уровня рисков. Прежде всего, каждое нечеткое отклонение может быть дефазифицировано выбранным методом. Кроме того, может быть рассчитан индекс нечеткости отклонения, отражающий степень размытости нечеткого отклонения [58].

В работе [42] предложен способ интерпретации уровня риска на основе соотнесения с максимально возможным значением. В рамках альтернативного подхода рассчитываются коэффициенты соответствия каждого нечеткого отклонения интервалам, на которые разбито универсальное множество [18]. Распределение коэффициентов соответствия определяет качественную оценку риска.

Коэффициенты соответствия представляют собой относительные площади фигур, ограниченных кривой функции принадлежности сверху и заданным альфа-уровнем снизу. Важно отметить, что выбор альфа-уровня (так же, как и выбор уровней достоверности) определяет толерантность ЛПР к неопределенности: чем меньше альфа, тем больше толерантность. Изменение толерантности ЛПР к неопределенности может привести к изменению качественных оценок рисков. Причем, как будет показано ниже, эти изменения могут быть двусторонними: для одних показателей при увеличении альфа-уровня оценки рисков будут повышаться, для других, наоборот, понижаться. Учет толерантности ЛПР к неопределенности является значимым преимуществом предлагаемого метода оценки рисков недостижения целей по развитию ИКО.

2. Нечеткая модель

Пусть сформировано каузальное поле показателей развития ИКО. Определены нечеткие значения «качественных» показателей нижнего уровня. Осуществлена фазификация четких значений «количественных» показателей. Заданы системы нечеткого вывода (либо упрощенные процедуры [59]), позволяющие получить нечеткие значения

показателей ИКО всех уровней иерархии. Определены целевые и рассчитаны текущие значения всех показателей [52].

Пусть заданы сценарии возможных изменений внутренней и внешней среды, определены их нечеткие вероятности. Сформировано множество возможных проектов по развитию ИКО, нечетко заданы их бюджеты. Определены изменения текущих значений показателей нижнего уровня (и, через них, всех показателей в иерархии) в результате реализации каждого проекта для каждого сценария [53].

Отметим, что значения всех показателей ИКО (кроме самого нижнего уровня иерархии), вероятности сценариев, бюджеты проектов и изменения показателей нижнего уровня являются нечеткими числами Гауссова типа. Значения показателей нижнего уровня являются трапециевидными нечеткими числами.

Формируем программу развития ИКО на основе одной из предложенных нечетких оптимизационных моделей (представляющих собой нечеткие задачи булева квадратичного программирования) [53]. Напомним, что модели отличаются целевыми функциями (максимизация удельной полезности или минимизация риска портфеля проектов) и ограничениями (на совокупный бюджет программы развития, на величину риска программы или на величину ожидаемой удельной полезности). Также напомним, что состав оптимального портфеля проектов зависит от заданных уровней достоверности (на целевую функцию и ограничения). Для выбранного оптимального портфеля имеем ожидаемые нечеткие значения всех показателей ИКО.

Рассчитываем степени недостижения целевых показателей ИКО как относительные отклонения ожидаемых значений от целевых следующим образом:

$$\Delta_i = \frac{IC_i^T - IC_i^E}{IC_i^T}, \quad (1)$$

где Δ_i – степень недостижения целевого значения i -го показателя ИКО;

IC_i^T – целевое значение i -го показателя ИКО;

IC_i^E – ожидаемое значение i -го показателя ИКО.

Заметим, что в общем случае в силу нечеткости переменных

$$\Delta_i \neq 1 - \frac{IC_i^E}{IC_i^T}.$$

Важно отметить, что если $IC_i^E > IC_i^T$ (для выбранного метода сравнения нечетких множеств), все равно могут существовать риски недостижения целевого значения i -го показателя. В этом случае нечеткие относительные отклонения ожидаемых значений от целевых будем рассчитывать по формуле (2):

$$\Delta_i = \frac{IC_i^E - IC_i^T}{IC_i^E}. \quad (2)$$

Пусть $IC_i^T > IC_i^E$. Тогда $(\xi_i; \eta_i) \subseteq (a_i; b_i)$, где $(\xi_i; \eta_i)$ – носитель нечеткого множества Δ_i , a_i есть инфимум носителя нечеткого множества

$$\frac{IC_i^T - IC_i^T}{IC_i^T},$$

b_i есть супремум носителя нечеткого множества

$$\frac{IC_i^T}{IC_i^T}.$$

Если $IC_i^E > IC_i^T$, то в качестве a_i следует брать инфимум носителя нечеткого множества

$$\frac{IC_i^E - IC_i^E}{IC_i^E},$$

в качестве b_i – супремум носителя нечеткого множества

$$\frac{IC_i^E}{IC_i^E}.$$

Рассмотрим биекции $f_i : (a_i; b_i) \rightarrow (0; 1)$,

$$f_i(x) = \frac{x - a_i}{b_i - a_i}. \quad (3)$$

Данные отображения позволяют перейти от нечетких отклонений Δ_i к нечетким множествам Δ'_i , носители которых являются подмножествами интервала $(0; 1)$.

Рассчитываем индексы нечеткости множеств Δ'_i заданным методом [60]. Обозначим их θ_i . Осуществляем дефазификацию нечетких множеств Δ'_i одним из выбранных методов. Полученные четкие значения обозначим ω_i .

Разбиваем интервал $(0; 1)$ на h интервалов $(0; \xi_1), (\xi_1; \xi_2), \dots, (\xi_{h-1}; 1)$ (эти интервалы могут быть равными, но в общем случае это необязательно).

Вычисляем коэффициенты соответствия нечетких множеств Δ'_i этим интервалам $(0 \leq \alpha < 1)$. Обозначим их $\delta_1^i, \delta_2^i, \dots, \delta_h^i$.

При $a = 1$, δ_j^i есть мера пересечения ядра нечеткого множества Δ_i^j и интервала $(\xi_{j-1}^i; \xi_j^i)$. В качестве метода дефазификации для единичного альфа-уровня разумно использовать метод среднего максимума.

Качественная оценка риска недостижения целевого значения i -го показателя ИКО происходит в заданной лингвистической шкале на основании распределения коэффициентов $\delta_1^i, \delta_2^i, \dots, \delta_h^i$. Если $IC_i^T > IC_i^E$, то чем больше коэффициенты соответствия с меньшими нижними индексами и меньше коэффициенты с большими нижними индексами, тем меньше уровень риска, и наоборот. Если $IC_i^E > IC_i^T$, то уровень риска тем меньше, чем меньше коэффициенты соответствия с меньшими нижними индексами и больше коэффициенты с большими нижними индексами.

Также во внимание принимаются ω_i и θ_i . Заметим, что чем меньше θ_i , тем надежнее полученные качественные оценки рисков, и наоборот.

В дальнейшем может быть предложена формализованная процедура определения некоторого интегрального коэффициента (как функции переменных $\delta_1^i, \delta_2^i, \dots, \delta_h^i, \omega_i, \theta_i$), на основании которого и будет происходить интерпретация уровня риска. Однако подбор такой функции осложняется немотонностью в общем случае последовательности $\delta_1^i, \delta_2^i, \dots, \delta_h^i$.

3. Апробация метода

Предложенный метод апробирован на примере крупного регионального университета (Владивостокского государственного университета, ВВГУ). На примере данного вуза ранее были апробированы отдельные нечеткие модели, которые легли в основу разработанного метода [51–53].

Иерархическая система (каузальное поле) показателей развития ИКО представлена на *рисунке 2*. «Качественные» показатели ИКО нижнего уровня выделены желтым цветом, «количественные» показатели отмечены зеленым цветом.

Целевые значения «количественных» показателей были взяты из стратегии университета, текущие значения – из системы управленческого учета. Четкие текущие и целевые значения были фазифицированы предложенным в работе [52] способом. Ранее были также получены текущие значения «качественных» показателей в виде нечетких чисел Гауссова типа [52]. Аналогичным образом были определены их целевые значения (*таблица 1*).

Далее были рассчитаны нечеткие целевые и текущие значения показателей ИКО всех вышележащих уровней иерархии. Для этого, в том числе, были сформированы базы нечетких продукционных правил для нижнего иерархического уровня. Дефазифицированные методом центра тяжести целевые и текущие значения показателей интеллектуального капитала университета всех уровней иерархии приведены в *таблице 2*.

На следующем шаге была сформирована совокупность стратегических мероприятий (проектов), способствующих развитию интеллектуального капитала вуза. Бюджеты проектов были экспертно оценены в заданной лингвистической шкале. Средневзвешенные экспертные оценки бюджетов проектов в виде нечетких чисел Гауссова типа приведены в *таблице 3*.

Большая часть проектов (проекты 1, 2, 3, 5, 8) явным образом направлена на повышение человеческого капитала университета. В то же время, каждый из них влияет и на организационный капитал, и почти все (кроме пятого) – на отношенческий капитал (пусть и в меньшей степени). Проекты 4 и 7 ориентированы в первую очередь на повышение отношенческого капитала, при этом проект 4 частично влияет также на человеческий и организационный капиталы (за счет внутренних стейкхолдеров вуза). Проект 6, прежде всего, призван обеспечить рост организационного капитала, при этом он также значительно влияет на отношенческий капитал и в некоторой степени на человеческий капитал университета.

Далее были рассмотрены три сценария, нечеткие вероятности которых аппроксимируются гауссианами: $\mu = 0,2955$, $\sigma = 0,0318$ (для пессимистичного сценария); $\mu = 0,5238$, $\sigma = 0,0497$ (для реалистичного сценария); $\mu = 0,1974$, $\sigma = 0,0226$ (для оптимистичного сценария).

В рамках сценариев определены изменения показателей развития ИКО нижнего уровня вследствие реализации каждого проекта. Средневзвешенные экспертные ответы в виде нечетких чисел Гауссова типа частично приведены в *таблице 4*. В таблице отсутствует первый проект, поскольку его реализация приводит к изменению значений только тех показателей, на которые другие проекты значимо не влияют.

Формирование программы развития ИКО осуществлялось по критерию минимума риска программы при ограничениях на бюджет программы (70 млн руб.) и величину ожидаемой удельной по-

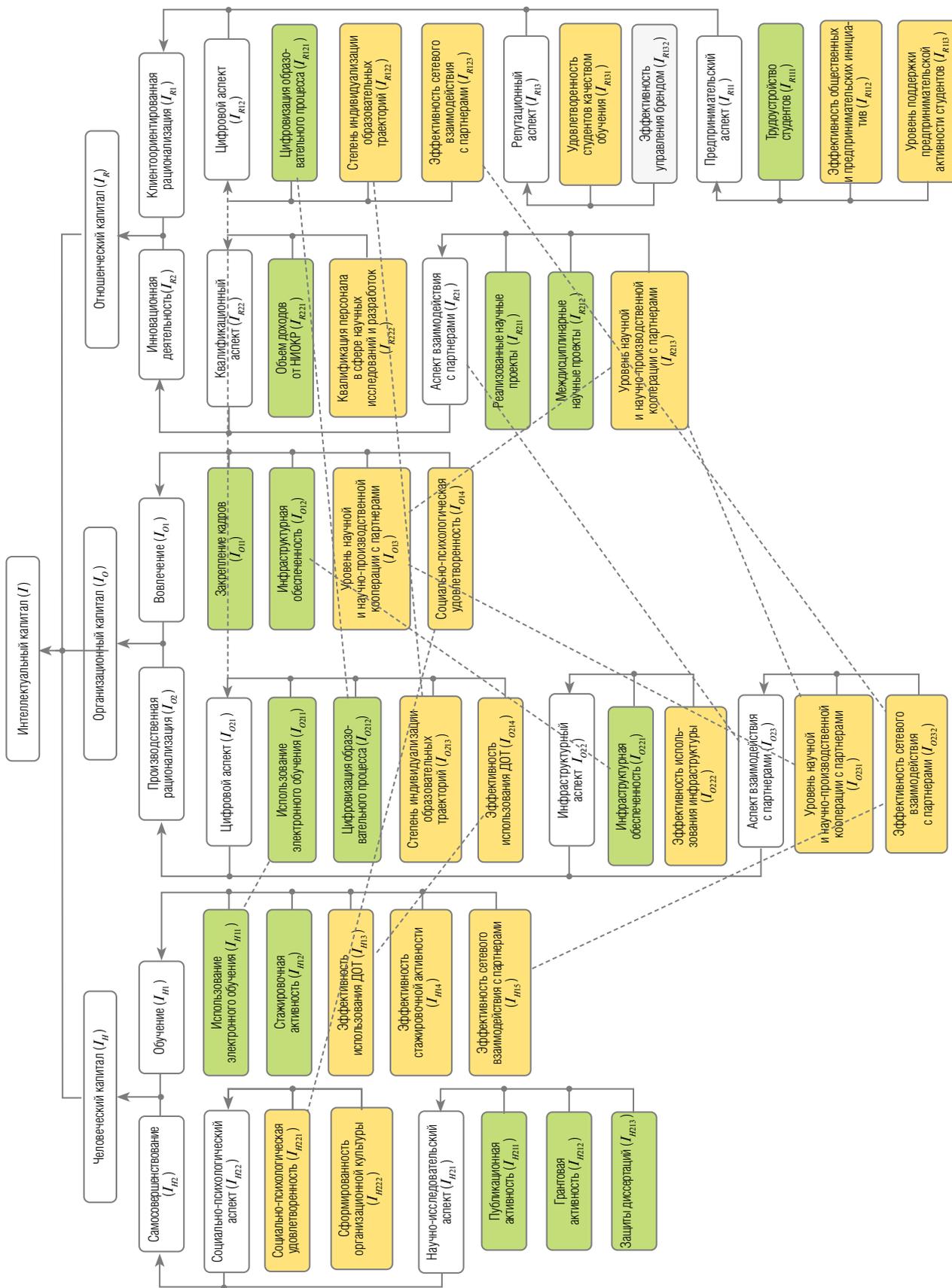


Рис. 2. Каузальное поле показателей развития интеллектуального капитала ВВГУ.

Таблица 1.

Текущие и целевые значения «качественных» показателей ИКО ВВГУ¹

Показатель	Структурный компонент ИКО	Тип когнитивной активности	Параметры аппроксимирующей гауссианы			
			Текущее значение		Целевое значение	
			μ	σ	μ	σ
Эффективность использования ДОТ (I_{H13} , I_{O214})	Человеческий капитал	Обучение	3,1492	0,4778	5,5782	0,6227
Эффективность стажировочной активности (I_{H14})	Человеческий капитал	Обучение	1,3452	0,2555	2,7812	0,3451
Социально-психологическая удовлетворенность (I_{H221} , I_{O14})	Человеческий капитал, организационный капитал	Самосовершенствование, вовлечение	7,4240	0,8361	8,1243	0,7362
Сформированность организационной культуры (I_{H222})	Человеческий капитал	Самосовершенствование	5,3308	0,5708	6,4687	0,6391
Уровень научной и научно-производственной кооперации с партнерами (I_{O13} , I_{O231} , I_{R213})	Организационный капитал, отношенческий капитал	Вовлечение, клиентоориентированная рационализация, инновационная деятельность	3,1332	0,4081	5,2634	0,6132
Эффективность использования инфраструктуры (I_{O222})	Организационный капитал	Вовлечение, производственная рационализация	9,0226	0,7395	9,3461	0,6564
Степень индивидуализации образовательных траекторий (I_{O213} , I_{R122})	Организационный капитал, отношенческий капитал	Производственная рационализация, клиентоориентированная рационализация	1,3452	0,2555	2,6843	0,3154
Эффективность сетевого взаимодействия с партнерами (I_{H15} , I_{O232} , I_{R123})	Организационный капитал, отношенческий капитал	Производственная рационализация, клиентоориентированная рационализация	3,1492	0,4778	5,5617	0,5996
Удовлетворенность студентов качеством обучения (I_{R131})	Отношенческий капитал	Клиентоориентированная рационализация	5,3308	0,5708	6,9453	0,6124
Эффективность управления брендом (I_{R132})	Отношенческий капитал	Клиентоориентированная рационализация	7,3888	0,6720	8,2164	0,7985
Эффективность общественных и предпринимательских инициатив (I_{R112})	Отношенческий капитал	Клиентоориентированная рационализация	3,1492	0,4778	5,8041	0,6124
Уровень поддержки предпринимательской активности студентов (I_{R113})	Отношенческий капитал	Клиентоориентированная рационализация	3,1654	0,5360	5,7926	0,6309
Квалификация персонала в сфере научных исследований и разработок (I_{R222})	Отношенческий капитал	Инновационная деятельность	5,3308	0,5708	7,8098	0,7068

¹ Фрагмент данной таблицы был представлен в одной из уже опубликованных статей авторов [52]. В данной статье добавлены два последних столбца, в которых приведены дополнительно рассчитанные параметры гауссиан для целевых значений показателей.

Таблица 2.

**Дефазифицированные целевые, текущие и ожидаемые значения
целевых показателей интеллектуального капитала университета**

Нечеткая переменная	Текущее значение	Целевое значение	Ожидаемое значение
I	5,131	6,942	6,408
I_H	5,226	6,933	6,441
I_O	5,012	6,985	5,547
I_R	4,612	6,502	5,862
I_{H1}	2,829	5,218	4,426
I_{H2}	5,515	7,145	7,085
I_{O1}	5,459	6,878	7,464
I_{O2}	5,012	7,035	5,547
I_{R1}	4,612	6,502	5,862
I_{R2}	4,852	7,150	7,938
I_{H21}	4,099	6,517	5,635
I_{H22}	6,660	7,659	8,772
I_{O21}	2,829	5,205	4,454
I_{O22}	7,189	8,214	7,189
I_{O23}	3,939	6,775	4,452
I_{R11}	5,000	7,047	6,463
I_{R12}	2,829	5,440	3,452
I_{R13}	5,341	6,591	6,773
I_{R21}	2,885	5,623	3,672
I_{R22}	5,415	8,393	9,141

Таблица 3.

Проекты по развитию интеллектуального капитала университета [53]

Номер проекта	Название проекта	Бюджет проекта (параметры аппроксимирующей гауссианы)	
		μ (млн. руб.)	σ
1	Проведение обучения преподавателей цифровым образовательным технологиям, в том числе технологиям создания MOOC	12,24	1,71
2	Организация стажировок преподавателей на предприятиях	5,18	0,82
3	Совершенствование системы материального и нематериального поощрения и стимулирования персонала	20,93	2,32
4	Выявление запросов стейкхолдеров (абитуриентов, родителей, студентов, работодателей, педагогического сообщества) к университету	3,87	0,45
5	Организация мероприятий (деловых, творческих, спортивных, профессиональных), направленных на сплочение коллектива	4,21	0,74
6	Развитие инфраструктурной составляющей университета	18,36	2,17
7	Проведение социально ориентированных и социально значимых мероприятий на базе университета	6,53	0,98
8	Комплексная поддержка развития научной деятельности в университете	20,34	3,19

Таблица 4.

**Нечеткие изменения показателей развития интеллектуального капитала
университета нижнего уровня в результате осуществления проектов
в рамках сценариев (фрагмент)**

Показатели ИКО Номера проектов	I_{H211}	I_{H221} (I_{O14})	I_{O11}	I_{R111}	I_{R113}	I_{R131}	I_{R132}	I_{R221}	I_{R222}
2				(0,241; 0,020) (0,139; 0,044) (0,078; 0,022)		(0,238; 0,022) (0,132; 0,019) (0,086; 0,011)		(0,152; 0,011) (0,106; 0,046) (0,048; 0,023)	(0,122; 0,011) (0,92; 0,046) (0,037; 0,023)
3	(0,150; 0,023) (0,090; 0,019) (0,035; 0,008)	(0,218; 0,013) (0,152; 0,030) (0,097; 0,011)	(0,225; 0,043) (0,220; 0,012) (0,153; 0,042)					(0,221; 0,048) (0,139; 0,014) (0,053; 0,024)	
4		(0,156; 0,016) (0,124; 0,013) (0,089; 0,009)		(0,231; 0,047) (0,210; 0,043) (0,121; 0,049)	(0,102; 0,046) (0,025; 0,043) (0,014; 0,021)	(0,153; 0,040) (0,075; 0,016) (0,028; 0,043)	(0,134; 0,040) (0,068; 0,044) (0,032; 0,012)	(0,148; 0,011) (0,102; 0,046) (0,051; 0,023)	
5		(0,241; 0,018) (0,141; 0,019) (0,081; 0,014)	(0,042; 0,013) (0,023; 0,006) (0,021; 0,005)						
6		(0,148; 0,015) (0,118; 0,012) (0,076; 0,008)				(0,147; 0,038) (0,091; 0,015) (0,059; 0,007)			
7				(0,136; 0,018) (0,087; 0,009) (0,048; 0,007)	(0,049; 0,037) (0,025; 0,023) (0,016; 0,006)		(0,227; 0,015) (0,210; 0,023) (0,149; 0,011)		
8	(0,205; 0,027) (0,131; 0,031) (0,073; 0,012)		(0,189; 0,016) (0,154; 0,030) (0,097; 0,029)					(0,226; 0,049) (0,204; 0,037) (0,117; 0,012)	(0,233; 0,049) (0,224; 0,037) (0,146; 0,012)

лезности (0,6) при уровне достоверности 0,9. В программу вошли проекты с номерами: 1, 2, 3, 4, 8. Ожидаемая удельная полезность портфеля равна 0,64, ожидаемый бюджет портфеля равен 62,56 млн руб.

Расчитанные ожидаемые нечеткие изменения всех показателей развития ИКО в результате осуществления оптимального портфеля проектов позволили получить ожидаемые нечеткие значения показателей развития ИКО всех уровней иерархии (их дефазифицированные центроидным методом значения приведены *таблице 2*). Для четырех показателей (I_{O1} , I_{R2} , I_{H22} , I_{R13}) центры тяжести нечетких ожидаемых значений превысили центры тяжести нечетких целевых значений, что, как было отмечено выше, не исключает риски недостижения целевых значений показателей.

Затем по формуле (1) были рассчитаны нечеткие значения относительных отклонений ожидаемых значений от целевых (нечеткие степени недостижения).

Далее были подобраны отображения, позволяющие осуществить переход от нечетких отклонений Δ_i к нечетким нормированным отклонениям Δ'_i , (формула (2)), для которых были рассчитаны индексы нечеткости Ягера с линейной метрикой Хэмминга [61] (ИН), центры тяжести (ЦТ) и средние максимумы (СМ).

Интервал (0; 1) был разбит на пять равных интервалов (0; 0,2), (0,2; 0,4), ..., (0,8; 1), для которых были вычислены коэффициенты соответствия отклонений Δ'_i , (при альфа-уровнях 0; 0,5 и 1).

Приведем пример соответствующих расчетов для показателя I_{O2} , характеризующего когнитивную активность «Производственная рационализация».

Нечеткое нормированное отклонение ожидаемого значения показателя I_{O2} от его целевого значения приведено на *рисунке 3*. Индекс нечеткости данного нечеткого множества равен 0,269; центр тяжести – 0,493; средний максимум – 0,647.

В *таблице 5* приведены значения коэффициентов соответствия нечеткого множества заданным пяти интервалам для различных альфа-уровней.

Рассчитанные коэффициенты для всех показателей и полученные на их основе качественные интерпретации уровней рисков недостижения целевых показателей по развитию интеллектуального капитала университета (в лингвистической шкале {Низкий (Н); Пониженный (ПН); Средний (С); Повышенный (ПВ); Высокий (В)}) приведены в *таблице 6*.

Нетрудно видеть, что полученные качественные интерпретации уровней рисков могут существенно зависеть от выбранного альфа-уровня. Так, для интегрального показателя человеческого капитала I_H оценка риска недостижения его целевого значения меняется от «Пониженный» (при $\alpha = 0$) до «Средний» (при $\alpha = 0,5$) и, далее, до «Повышенный» (при $\alpha = 1$). Для интегрального показателя организационного капитала I_O оценка риска недостижения его целевого значения, наоборот, снижается при увеличении α от «Средний» до «Пониженный». Для показателей I_{H2} и I_{O2} , соответствующих когнитивным актив-

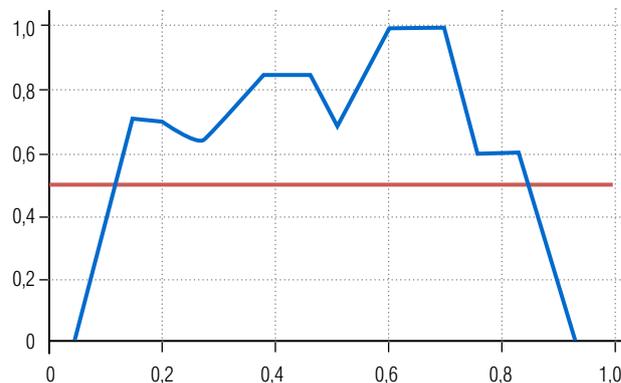


Рис. 3. Нечеткое нормированное отклонение ожидаемого значения показателя I_{O2} от его целевого значения.

ностям «Самосовершенствование» и «Производственная рационализация», при росте α оценка риска повышается от «Средний» до «Повышенный» (для показателя I_{O2} об этом еще более наглядно свидетельствуют результаты, представленные в *таблице 5*). Здесь следует обратить внимание на малый индекс нечеткости показателя Δ'_{H2} , что свидетельствует о надежности оценок риска для I_{H2} . При этом оценка риска для показателя I_{O21} , характеризующего «Цифровой аспект» производственной рационализации оценка риска меняется от «Пониженный» до «Средний».

Таблица 5.

Оценки рисков недостижения целевого значения показателя I_{O2}

Альфа-уровень	Коэффициенты соответствия интервалам					Интерпретация уровня риска
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	
0	0,35	0,72	0,81	0,85	0,24	Средний
0,1	0,31	0,69	0,79	0,84	0,20	Средний
0,2	0,27	0,65	0,76	0,72	0,16	Средний
0,3	0,22	0,61	0,73	0,79	0,12	Средний
0,4	0,18	0,54	0,69	0,76	0,08	Средний
0,5	0,13	0,45	0,63	0,71	0,04	Средний
0,6	0,07	0,32	0,54	0,64	0	Средний
0,7	0	0,15	0,40	0,57	0	Повышенный
0,8	0	0,04	0,21	0,56	0	Повышенный
0,9	0	0	0,06	0,51	0	Повышенный
1	0	0	0	0,47	0	Повышенный

Таблица 6.

**Оценки рисков недостижения целевых показателей
интеллектуального капитала университета**

Нечеткая переменная	Нормированная степень недостижения			Коэффициенты соответствия интервалам ($\alpha = 0 / \alpha = 0,5 / \alpha = 1$)					Интерпретация уровня риска ($\alpha = 0 / \alpha = 0,5 / \alpha = 1$)
	ИН	ЦТ	СМ	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	
I	0,331	0,464	0,456	0,19 / 0 / 0	0,81 / 0,65 / 0,06	0,95 / 0,92 / 0,64	0,62 / 0,34 / 0	0,08 / 0 / 0	С / С / С
I_H	0,275	0,462	0,598	0,39 / 0 / 0	0,71 / 0,54 / 0	0,81 / 0,67 / 0,21	0,57 / 0,42 / 0,21	0,07 / 0 / 0	ПН / С / ПВ
I_O	0,362	0,489	0,332	0,13 / 0 / 0	0,85 / 0,71 / 0,70	0,92 / 0,89 / 0,20	0,76 / 0,55 / 0	0,10 / 0 / 0	С / С / ПН
I_R	0,263	0,464	0,450	0,18 / 0 / 0	0,64 / 0,36 / 0	0,88 / 0,78 / 0,36	0,46 / 0,11 / 0	0,07 / 0 / 0	С / С / С
I_{H1}	0,311	0,428	0,424	0,15 / 0 / 0	0,79 / 0,64 / 0,29	0,85 / 0,77 / 0,52	0,32 / 0,03 / 0	0,00 / 0 / 0	С / С / С
I_{H2}	0,148	0,491	0,613	0,23 / 0 / 0	0,53 / 0,09 / 0	0,56 / 0,12 / 0	0,59 / 0,31 / 0,12	0,05 / 0 / 0	С / ПВ / ПВ
I_{O1}	0,313	0,639	0,634	0 / 0 / 0	0,39 / 0,02 / 0	0,88 / 0,85 / 0,73	0,97 / 0,97 / 1	0,74 / 0,33 / 0,12	ПН / ПН / ПН
I_{O2}	0,269	0,493	0,647	0,35 / 0,13 / 0	0,72 / 0,45 / 0	0,81 / 0,63 / 0	0,85 / 0,71 / 0,47	0,24 / 0,04 / 0	С / С / ПВ
I_{R1}	0,263	0,464	0,450	0,18 / 0 / 0	0,64 / 0,36 / 0	0,88 / 0,78 / 0,36	0,46 / 0,11 / 0	0,07 / 0 / 0	С / С / С
I_{R2}	0,206	0,611	0,604	0,03 / 0 / 0	0,37 / 0 / 0	0,65 / 0,37 / 0,36	0,72 / 0,31 / 0,46	0,57 / 0 / 0	ПН / ПН / ПН
I_{H21}	0,360	0,457	0,450	0,28 / 0,07 / 0	0,77 / 0,59 / 0,29	0,93 / 0,91 / 0,79	0,61 / 0,28 / 0	0,05 / 0 / 0	С / С / С
I_{H22}	0,263	0,530	0,638	0,02 / 0 / 0	0,25 / 0 / 0	0,36 / 0,08 / 0	0,64 / 0,44 / 0,23	0,53 / 0 / 0	ПН / ПН / ПН
I_{O21}	0,312	0,423	0,471	0,21 / 0 / 0	0,83 / 0,70 / 0	0,85 / 0,74 / 0,61	0,27 / 0,02 / 0	0 / 0 / 0	ПН / ПН / С
I_{O22}	0,306	0,379	0,375	0,14 / 0 / 0	0,78 / 0,67 / 0,67	0,62 / 0,38 / 0,38	0,07 / 0 / 0	0 / 0 / 0	ПН / ПН / ПН
I_{O23}	0,233	0,518	0,500	0,05 / 0 / 0	0,56 / 0,18 / 0	0,89 / 0,85 / 0,56	0,60 / 0,22 / 0	0,13 / 0 / 0	С / С / С
I_{R11}	0,321	0,403	0,397	0,19 / 0 / 0	0,86 / 0,76 / 0,51	0,80 / 0,71 / 0,45	0,23 / 0 / 0	0 / 0 / 0	ПН / ПН / ПН
I_{R12}	0,312	0,497	0,457	0,04 / 0 / 0	0,59 / 0,34 / 0,12	0,92 / 0,92 / 0,68	0,51 / 0,18 / 0	0,06 / 0 / 0	С / С / С
I_{R13}	0,374	0,564	0,562	0,03 / 0 / 0	0,08 / 0 / 0,4	0,71 / 0,52 / 0,37	0,34 / 0,09 / 0	0,05 / 0 / 0	ПН / С / С
I_{R21}	0,373	0,511	0,494	0,02 / 0 / 0	0,70 / 0,52 / 0,31	0,94 / 0,94 / 0,94	0,77 / 0,61 / 0,31	0,09 / 0 / 0	С / С / С
I_{R22}	0,277	0,333	0,342	0,34 / 0,01 / 0	0,89 / 0,82 / 0,57	0,54 / 0,25 / 0	0,08 / 0 / 0	0 / 0 / 0	ПН / ПН / ПН

Отдельно обратим внимание на показатели, у которых центр тяжести ожидаемого значения превосходит центроид целевого значения (I_{O1} , I_{R2} , I_{H22} , I_{R13}). Для всех этих показателей при $\alpha = 0$ риск недостижения целевого значения «Пониженный», равно как и для остальных α (исключая лишь I_{R13} , для которого при росте α оценка риска доходит до значения «Средний»). Ни в каком случае оценка риска не достигла значения «Низкий», что по всей видимости связано с тем, что превышение ожидаемых значений над целевыми (по центрам тяжести) оказалось не очень значительным. Причем для показателя I_{R13} это превышение оказалось наименьшим, именно поэтому оценка риска недостижения его целевого значения достигла значения «Средний».

4. Обсуждение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработанный метод оценки рисков недостижения целевых показателей с сфере развития ИКО вносит вклад в инструментальные составляющие методологии управления формированием и развитием интеллектуального капитала, теории управления экономическим риском, а также PPRM (управление рисками портфеля проектов) как самостоятельную область исследований. Апробация метода на примере конкретной организации (крупного регионального университета) демонстрирует возможность его практического применения.

2. Предложенный метод является нечетким. Его использование не требует наличия исторических данных и вероятностных прогнозов и потому перспективно для исследования слабоструктурированных явлений и процессов (а именно, процессов формирования и развития интеллектуального капитала в цифровой экономике) в условиях значительного увеличения скорости и непредсказуемости изменений во внешней среде.

3. Нечеткость метода дает возможность учета толерантности ЛПР к неопределенности. Такая возможность осуществляется: на этапе формирования каузального поля показателей ИКО (при выборе нечетких «границ отсечения» эксплицитных и имплицитных факторов и методов дефазификации); на этапе оценки текущих и определения целевых значений показателей (при выборе систем нечеткого логического вывода (баз нечетких продукционных правил и алгоритмов нечеткого вывода)); на этапе формирования программы развития ИКО (при задании ограничений на риск и выборе уровней достоверности); на этапе количественной оценки и качественной интерпретации уровня рисков недостижения целевых показателей по развитию ИКО (при расчете коэффициентов соответствия нормированных отклонений ожидаемых значений показателей от целевых (а именно, выборе альфа-уровня), а также возможном задании формулы расчета интегрального уровня риска). Различия в толерантности ЛПР к неопределенности приводят к различиям в оценках рисков недостижения целевых показателей.

4. Использование трапециевидных нечетких чисел в качестве функций принадлежности значений лингвистических шкал обеспечивает простоту и прозрачность при проведении экспертных опросов. В свою очередь, дальнейший переход к нечетким числам Гауссова типа (и, далее, произвольным нечетким числам) позволяет нивелировать недостатки, возникающие при использовании трапециевидных нечетких чисел (в частности, при сведении задач нечеткой оптимизации к четким задачам булева квадратичного программирования).

5. Разработанный метод является универсальным в смысле возможной применимости к различным типам организаций разной отраслевой принадлежности (все этапы базовой схемы метода будут стандартными). При этом специфика конкретной организации будет проявляться: в каузальном поле показателей развития ИКО (наборе показателей двух нижних уровней иерархии); способах оценки текущих и определения целевых значений показате-

телей; подходах к формированию программы развития ИКО.

6. Успешность практического использования метода для конкретной организации зависит не столько от ее типа и отраслевой принадлежности, сколько от выполнения следующих требований. Прежде всего, это наличие формализованной стратегии организации, в которой стратегические цели, связанные с развитием ИКО, встроены в иерархическую систему всех стратегических целей организации. При этом должны быть установлены результирующие показатели стратегических целей. В системе управленческого учета организации должна быть заложена возможность получения количественных значений необходимых показателей. Для расчета значений нечетких переменных требуется соответствующее программное средство, адаптированное под данную организацию.

7. Разработанный метод также является универсальным в смысле возможной применимости к оценке рисков недостижения целевых значений различных иерархических систем показателей с большим числом имплицитных факторов и «качественных» показателей.

Заключение

Разработан метод оценки рисков недостижения целевых показателей ИКО. Предложенный метод базируется на следующих нечетких моделях: нечеткой модели формирования каузального поля показателей развития ИКО в увязке со стратегией организации и типами когнитивной активности; нечеткой модели оценки показателей ИКО всех иерархических уровней; нечетких моделях оптимизации портфеля проектов по развитию ИКО с учетом рисков.

Предложенный метод имеет следующие отличительные особенности. Система показателей ИКО представляет собой многоуровневую иерархическую систему с возможными циклами. Один из уровней этой системы образуют показатели, отражающие способности организации к различным видам когнитивной активности, увязанным с основными компонентами ИКО. На нижнем уровне иерархии находятся эксплицитные и имплицитные факторы развития ИКО, процесс выявления которых достаточно гибок. При определении текущих и целевых значений показателей ИКО используется оригинальный способ оценки «качественных» показателей и интегральных показателей ИКО всех

иерархических уровней, позволяющий, в том числе, получать числовые оценки разброса (размытости) рассчитанных значений показателей. При формировании программы развития ИКО имеется возможность выбора различных нечетких оптимизационных моделей, в которых учет риска происходит либо в целевой функции, либо в нечетких ограничениях. Сценарный подход к моделированию изменений внутренних и внешних условий, лежащий в основе нечетких моделей выбора оптимального портфеля проектов по развитию ИКО, позволяет получить ожидаемые значения показателей ИКО всех уровней иерархии. Предложенный способ получения дополнительной информации при расчете нечетких отклонений ожидаемых значений показателей от целевых позволяет повысить точность качественной интерпретации уровня рисков недо-

стижения целей организации по развитию интеллектуального капитала.

Еще одним значимым преимуществом предлагаемого метода является возможность учета толерантности ЛПП к неопределенности. Такая возможность реализуется при формировании казуального поля показателей ИКО, при оптимизации портфеля проектов по развитию ИКО и, самое главное, при интерпретации уровней рисков недо-стижения целей по развитию ИКО. ■

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-01091 (<https://rscf.ru/project/23-28-01091/>) в ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», Приморский край.

Литература

1. Barry D. The relationship of strategic goals and planning processes to organizational performance. Unpublished Ph. D. Dissertation, University of Maryland, 1987.
2. Гурков И.Б. Факторы формирования и механизмы реализации стратегических целей российских компаний. Доклад на Секции экономики Отделения общественных наук РАН 13.03.2008. М., 2008.
3. Гурков И.Б. Интегрированная метрика стратегического процесса – попытка теоретического синтеза и эмпирической апробации // Российский журнал менеджмента. 2007. Т. 5. № 2. С. 3–28.
4. Митяков С.Н., Митяков Е.С. Развитие теории рисков и пороговых значений экономической безопасности // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. № 5. С. 83–113. https://doi.org/10.52180/2073-6487_2023_5_83_113
5. Васильков Ю.В., Гушина Л.С. Анализ рисков недостижения целей при управлении организацией // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2017. № 1. С. 5–12.
6. Морозов В.О. Формализация зависимости между уровнем достижения стратегической цели и значениями ее показателей на основе знакопеременной функции полезности // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 457.
7. Качалов Р.М. Управление экономическим риском. Теоретические основы и приложения. М.; СПб.: Нестор-История, 2012.
8. Гушина Л.С., Васильков Ю.В. Методика учета рисков при планировании развития предприятия // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2017. № 2(50). С. 105–112.
9. Лапочкина В.В., Долгова В.Н., Оршанская Ю.О., Шкилев И.Н. Оценка риска недостижения целевых и дополнительных показателей реализации национального проекта «Наука» // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2020. Т. 16. № 12(393). С. 2338–2362. <https://doi.org/10.24891/ni.16.12.2338>
10. Черешнев В.А., Васильева А.В., Коробицын Б.А. Оценка экономической эффективности государственных программ социальной направленности методами имитационного моделирования // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т. 16. № 1(460). С. 174–187. <https://doi.org/10.24891/ea.16.1.174>
11. Pishchalkina I., Tereshko E., Suloeva S. Application of self-organizing maps for risk assessment of mining and metallurgical enterprises // Sustainable Development and Engineering Economics. 2023. No. 1(7). P. 28–44. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2023.1.2>
12. Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Планирование и реализация федеральных проектов в арктических регионах с учетом факторов риска // Экономика. Налоги. Право. 2023. Т. 16. № 6. С. 49–59. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-6-49-59>
13. Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Методы оценки рисков реализации проектов хозяйственного развития арктических регионов // Экономика. Налоги. Право. 2023. Т. 16. № 3. С. 109–119. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-3-109-119>
14. Качалов Р.М., Слепцова Ю.А. Моделирование процедур регулирования экономического риска с применением теории нечетких множеств. Материалы III Международной молодежной научно-практической конференции. Саратов: Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 2014. С. 78–83.
15. Слепцова Ю.А. Управление риском в деятельности производственного предприятия на основе инструментария системной экономической теории и нечеткой логики. Дис. ... кандидата экономических наук. М., 2016.
16. Целых А.Н., Целых Л.А., Причина О.С. Методы нечеткой логики в управлении производственными процессами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 1(150). С. 111–119.
17. Стребкова Л.Н. Оценка риска предприятия, основанная на применении нечеткой нейронной сети // Вестник НГУЭУ. 2014. № 3. С. 147–154.

18. Мазелис Л.С., Солодухин К.С., Лавренюк К.И. Нечеткая модель анализа рисков развития социально-экономической системы на основе стейкхолдерского подхода // Вестник Тюменского государственного университета. Социально-экономические и правовые исследования. 2017. Т. 3. № 3. С. 242–260. <https://doi.org/10.21684/2411-7897-2017-3-3-242-260>
19. Дудин М.Н., Лясников Н.В., Проценко О.Д., Цветков В.А. Квантификация и оценка рисков проектов добычи углеводородных ресурсов в Арктике // Экономическая политика. 2017. Т. 12. № 4. С. 168–195. <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2017-4-07>
20. Solodukhin K.S. Fuzzy strategic decision-making models based on formalized strategy maps // AEBMR-Advances in Economics, Business and Management Research. 2019. Vol. 47. Proceedings of the International Scientific Conference “Far East Con” (ISC FEC 2018). P. 543–547. <https://doi.org/10.2991/iscfec-18.2019.136>
21. Micán C., Fernandes G., Araújo M. Project portfolio risk management: a structured literature review with future directions for research // International Journal of Information Systems and Project Management. 2021. Vol. 8. No. 3. P. 67–84. <https://doi.org/10.12821/ijispm080304>
22. Hofman M., Spalek S., Grela G. Shedding new light on project portfolio risk management // Sustainability. 2017. Vol. 9. No. 10. P. 1798–1816. <https://doi.org/10.3390/su9101798>
23. Ghasemi F., Sari M., Yousefi V., Falsafi R., Tamošaitienė J. Project portfolio risk identification and analysis, considering project risk interactions and using Bayesian networks // Sustainability. 2018. Vol. 10. No. 5. P. 1609–1631. <https://doi.org/10.3390/su10051609>
24. Guan D., Guo P., Hipel K., Fang L. Risk reduction in a project portfolio // Journal of Systems Science and Systems Engineering. 2017. Vol. 26. No. 1. P. 3–22. <https://doi.org/10.1007/s11518-016-5296-2>
25. Benajja K., Kjiri L. Hybrid approach for project portfolio selection taking account of resources management and interactions between projects // Journal of Digital Information Management. 2015. Vol. 13. No. 6. P. 451–461.
26. Клейнер Г.Б., Смоляк С.А. Эконометрические зависимости: методы и принципы построения. М.: Издательство “Наука”, 2000.
27. Kettunen J., Salo A. Estimation of downside risks in project portfolio selection // Production and Operations Management. 2017. Vol. 26. No. 10. P. 1839–1853. <https://doi.org/10.1111/poms.12727>
28. Mohagheghi V., Mousavi S.M., Vahdani B. A new multi-objective optimization approach for sustainable project portfolio selection: A real-world application under interval-valued fuzzy environment // Iranian Journal of Fuzzy Systems. 2016. Vol. 13. No. 6. P. 41–68. <https://doi.org/10.22111/ijfs.2016.2821>
29. Шаталова О.М. Эффективность инновационных процессов: нечетко-множественное моделирование и оценка в условиях нестохастической неопределенности. Ижевск: Издательство ИжГТУ, 2023.
30. Zaidouni A., Idrissi M.A.J., Bellabdaoui A. A Sugeno ANFIS model based on fuzzy factor analysis for IS/IT project portfolio risk prediction // Journal of Information and Communication Technology. 2023. Vol. 23. No. 2. P. 139–176. <https://doi.org/10.32890/jict2024.23.2.1>
31. Mehlatat M.K., Gupta P., Khan A.Z. An integrated fuzzy-grey relational analysis approach to portfolio optimization // Applied Intelligence. 2023. Vol. 53. P. 3804–3835. <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03499-z>
32. Khanjani Shiraz R., Tavana, M., Fukuyama H. A random-fuzzy portfolio selection DEA model using value-at-risk and conditional value-at-risk // Soft Computing. 2020. Vol. 24. P. 17167–17186. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05010-7>
33. Deng X., Yuan Y. A novel fuzzy dominant goal programming for portfolio selection with systematic risk and non-systematic risk // Soft Computing. 2021. Vol. 25. P. 14809–14828. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06226-x>
34. Rahiminezhad Galankashi M., Mokhatab Rafiei F., Ghezalbash M. Portfolio selection: a fuzzy-ANP approach // Financial Innovation. 2020. Vol. 6. No. 1. P. 1–34. <https://doi.org/10.1186/s40854-020-00175-4>
35. Mohseny-Tonekabony N., Sadjadi S.J., Mohammadi E., Tamiz M., Jones D.F. Robust, extended goal programming with uncertainty sets: an application to a multi-objective portfolio selection problem leveraging DEA // Annals of Operations Research. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05811-7>
36. Wang B., Li Y., Wang S., Watada J. A multi-objective portfolio selection model with fuzzy value-at-risk ratio // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. Vol. 26. No. 6. P. 3673–3687. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2842752>
37. Dehghani F. Simulation of annealing for portfolio selection in mean-pseudo-variance fuzzy model // SSRN Electronic Journal. 2023. P. 1–12. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4660934>
38. Nguyen V.D., Duyen N.K., Hai N.M., Duy B.K. Multicriteria portfolio selection with intuitionistic fuzzy goals as a pseudoconvex vector optimization // Lecture notes on data engineering and communications technologies. 2023. Vol. 187. P. 68–79. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46573-4_7
39. Abtahi S.H. Uncertain random portfolio optimization based on skew chance distribution // International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. 2023. Vol. 23. No. 1. P. 44–55. <https://doi.org/10.5391/ijfis.2023.23.1.44>
40. Yang X., Liu W., Chen S., Zhang Y. A multi-period fuzzy mean-minimax risk portfolio model with investor’s risk attitude // Soft Computing. 2021. Vol. 25. P. 2949–2963. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05351-3>
41. Клейнер Г.Б. Стратегия предприятия. М.: Издательство «Дело» АНХ, 2008.
42. Назаров Д.М. Модель оценки имплицитных факторов на основе нечетко-множественных описаний // Известия ДВФУ. Экономика и управление. 2016. № 4(80). С. 3–17. <https://doi.org/10.5281/zenodo.220793>
43. Макарова Д.В., Недолужко О.В., Солодухин К.С. Роль цифровизации экономики в развитии теории интеллектуального капитала организации // Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 5.0 (ИНПРОМ-2024): Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С. 215–219. <https://doi.org/10.18720/IEP/2024.2/50>

44. Cosa M., Pedro E., Urban B. How to assess the intellectual capital of firms in uncertain times: a systematic literature review and a proposed model for practical adoption // *Journal of Intellectual Capital*. 2024. Vol. 25. No. 7. P. 1–22. <https://doi.org/10.1108/JIC-05-2023-0096>
45. Bustamante A., Liberona D., Ferro R. Approach to measuring organizational performance from the perspective of intellectual capital // *Communications in computer and information science*. 2024. Vol. 2152. P. 73–85. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63269-3_6
46. Kozlovskiy S., Syniehub P., Kozlovskiy A., Lavrov R. Intellectual capital management of the business community based on the neuro-fuzzy hybrid system // *Neuro-Fuzzy Modeling Techniques in Economics*. 2022. Vol. 11. No. 11. P. 25–47. <https://doi.org/10.33111/nfnte.2022.025>
47. Çevik G., Arslan Ö. Analytic evaluation of intellectual capital for ship management companies under a fuzzy environment // *Journal of ETA Maritime Science*. 2022. Vol. 10. No. 3. P. 185–194. <https://doi.org/10.4274/jems.2022.41033>
48. Pokrovskaia N., Margulyan Ya., Lvin Yu., Bulatetskaia A. Neuro-technologies and Fuzzy Logic for Intellectual Capital Evaluation in Education and Business // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 940. Article 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/940/1/012090>
49. Lucchese M., Aversano N., Di Carlo F., Polcini P.T. Assessing the intellectual capital and related performance in the teaching process using FES models: first evidence in Italian universities // *WSEAS transactions on business and economics*. 2020. Vol. 17. P. 325–344. <https://doi.org/10.37394/23207.2020.17.34>
50. Gross-Gołacka E., Kusterka-Jefmańska M., Jefmański B. Can elements of intellectual capital improve business sustainability? – The perspective of managers of SMEs in Poland // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. No. 4. Article 1545. <https://doi.org/10.3390/su12041545>
51. Завалин Г.С., Недолужко О.В., Солодухин К.С. Формирование каузального поля показателей развития интеллектуального капитала организации: концепция и нечеткая экономико-математическая модель // *Бизнес-информатика*. 2023. Т. 17. № 3. С. 53–69. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.52.69>
52. Недолужко О.В., Солодухин К.С. Количественная оценка интеллектуального капитала университета на основе нечеткой модели // *Университетское управление: практика и анализ*. 2024. Т. 28. № 1. С. 34–49. <https://doi.org/10.15826/umpra.2024.01.003>
53. Makarova D.V., Nedoluzhko O.V., Solodukhin K.S., Zavalin G.S. Fuzzy optimization models for intellectual capital enhancing project portfolio selection under risk // *Journal of System and Management Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 7. P. 1–19. <https://doi.org/10.33168/JSMS.2024.0701>
54. Аньшин В.М., Демкин И.В., Царьков И.Н., Никонов И.М. Применение теории нечетких множеств к задаче формирования портфеля проектов // *Проблемы анализа рисков*. 2008. Т. 5. № 3. С. 8–21.
55. Dubois D., Prade H. *Possibility Theory*. New York: Plenum Press, 1988.
56. Wang J., Hwang W.-L. A fuzzy set approach for R&D portfolio selection using a real option valuation model // *Omega*. 2007. Vol. 35. No. 3. P. 247–257.
57. Furnham A., Marks J. Tolerance of Ambiguity: A Review of the Recent Literature // *Psychology*. 2013. Vol. 4. No. 9. P. 717–728. <https://doi.org/10.4236/psych.2013.49102>
58. Минаев Ю.Н., Филимонова О.Ю., Минаева Ю.И. Индекс нечеткости нечетких множеств в контексте концепции data mining // *Проблемы информатизации и управления*. 2012. Т. 3. № 39. С. 95–101.
59. Назаров Д.М. *Методология нечетко-множественной оценки имплицитных факторов в деятельности организации*. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2016.
60. De Luca A., Termini S. A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory // *Information and Control*. 1972. Vol. 20. No. 4. P. 301–312. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(72\)90199-4](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(72)90199-4)
61. Yager R.R. On the measure of fuzziness and negation. Part I: Membership in the unit interval // *International Journal of General Systems*. 1979. Vol. 5. No. 4. P. 221–229. <https://doi.org/10.1080/03081077908547452>

Об авторах

Солодухин Константин Сергеевич

доктор экономических наук, профессор

профессор, кафедра математики и моделирования, заведующий лабораторией, лаборатория стратегического планирования, Владивостокский государственный университет, Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41;

E-mail: k.solodukhin@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3619-1219

Завалин Георгий Сергеевич

начальник отдела, отдел интеллектуального анализа данных, стажер-исследователь, лаборатория стратегического планирования, Владивостокский государственный университет, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41;

E-mail: georgiy.zavalin08@vvsu.ru

ORCID: 0000-0003-4519-0242

Макарова Дарья Васильевна

ведущий специалист, аналитический отдел, стажер-исследователь, лаборатория стратегического планирования, Владивостокский государственный университет, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41;

E-mail: malnova.daria@vvsu.ru

ORCID: 0009-0002-8207-3010

Assessment of risks of failure to achieve target values of indicators for an organization's intellectual capital based on a fuzzy model

Konstantin S. Solodukhin

E-mail: k.solodukhin@mail.ru

Georgij S. Zavalin

E-mail: georgiy.zavalin08@vvsu.ru

Daria V. Makarova

E-mail: malnova.daria@vvsu.ru

Vladivostok State University, Vladivostok, Russia

Abstract

The processes of formation and development of intellectual capital in the digital economy are ill structured processes occurring in conditions of a significant increase in the speed and unpredictability of changes in the external environment. This makes it extremely difficult to use previous experience and probabilistic forecasts when assessing the risks of failure to achieve strategic goals for the development of the intellectual capital of an organization. At the same time, undesirable deviations in achieving these goals can lead to significant negative consequences. In this regard, there is a need to develop appropriate fuzzy methods and models, all of which determines the relevance of this work. The purpose of this study was to develop a fuzzy method for assessing the risks of failure to achieve the strategic goals of an organization in the field of intellectual capital development. The method is based on a fuzzy model developed by the authors which allows us to take into account the uncertainty tolerance of the decision maker. Testing the method on the example of a specific organization showed the possibility of its practical applicability. We provide quantitative assessments and qualitative interpretations of the risk levels of failure to achieve target indicators for the development of the intellectual capital of an organization (a large regional university).

Keywords: intellectual capital, fuzzy model, risks of failure to achieve goals, project portfolio risk management, tolerance to uncertainty

Citation: Solodukhin K.S., Zavalin G.S., Makarova D.V. (2025) Assessment of risks of failure to achieve target values of indicators for an organization's intellectual capital based on a fuzzy model. *Business Informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 72–92. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.72.92

References

- Barry D. (1987) *The relationship of strategic goals and planning processes to organizational performance*. Unpublished Ph. D. Dissertation, University of Maryland.
- Gurkov I.B. (2008) *Factors of formation and mechanisms of realization of strategic goals of Russian companies*. Report at the Economics Section of the Department of Social Sciences of the Russian Academy of Sciences. March 13, 2008 (in Russian).
- Gurkov I.B. (2007) Integrated metrics of strategy process – an attempt of theoretical synthesis and empirical validation. *Russian Management Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 3–28 (in Russian).
- Mityakov S.N., Mityakov E.S. (2023) Developing the theory of economic security risks and thresholds. *The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, no. 5, pp. 83–113 (in Russian). https://doi.org/10.52180/2073-6487_2023_5_83_113
- Vasilkov Yu.V., Gushchina L.S. (2017) Risk analysis of not achievement of the objectives in case of control of the organization. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management*, no. 1, pp. 5–12 (in Russian).
- Morozov V.O. (2013) Dependence formalization between level of achievement of the strategic objective and values of its indicators on the basis of sign-variable function of usefulness. *Modern Problems of Science and Education*, no. 6, pp. 457 (in Russian).
- Kachalov R.M. (2012) *Economic risk management. Theoretical foundations and applications*. Moscow; St. Petersburg: Nestor-History (in Russian).
- Gushchina L.S., Vasilkov Yu.V. (2017) Technique of the account of risks at planning enterprise developments. *Modern High Technologies. Regional Application*, no. 2(50), pp. 105–122 (in Russian).
- Lapochkina V.V., Dolgova V.N., Orshanskaya Yu.O., Shkilev I.N. (2020) Assessing the risk of benchmark and additional indicators of the Science national project. *National Interests: Priorities and Security*, vol. 16, no.12, pp. 2338–2362 (in Russian). <https://doi.org/10.24891/ni.16.12.2338>
- Chereshnev V.A., Vasil'eva A.V., Korobitsyn B.A. (2017) Assessing the economic efficiency of socially oriented government programs by simulation modeling methods. *Economic Analysis: Theory and Practice*, vol. 16, no.1, pp. 174–187 (in Russian). <https://doi.org/10.24891/ea.16.1.174>
- Pishchalkina I., Tereshko E., Suloeva S. (2023) Application of self-organizing maps for risk assessment of mining and metallurgical enterprises. *Sustainable Development and Engineering Economics*, no. 1(7), pp. 28–44. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2023.1.2>
- Novoselova I.Yu., Novoselov A.L. (2023) Planning and implementation of Federal projects in the Arctic regions, taking into account risk factors. *Economics, Taxes & Law*, vol. 16, no. 6, pp. 49–59 (in Russian). <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-6-49-59>
- Novoselova I.Yu., Novoselov A.L. (2023) Methods of risk assessment for the implementation of economic development projects in the Arctic regions. *Economics, Taxes & Law*, vol. 16, no. 3, pp. 109–119 (in Russian). <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2023-16-3-109-119>
- Kachalov R.M., Sleptsova Y.A. (2014) Modelling of procedure regulations of economic risk with application of fuzzy logic theory. *Proceedings of the III International Youth Scientific and Practical Conference*. Saratov: Saratov State University, pp. 78–83 (in Russian).
- Sleptsova Y.A. (2016) *Risk management in the activities of a manufacturing enterprise based on the tools of systemic economic theory and fuzzy logic*. Moscow: CEMI (in Russian).
- Tselykh A.N., Tselykh L.A., Prichina O.S. (2014) Fuzzy logic methods in the management of production processes. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, no. 1(150), pp. 111–119 (in Russian).
- Strebkova L.N. (2014) Risk assessment of enterprise based on application of fuzzy neural network. *Vestnik NSUEM*, no. 3, pp. 147–154 (in Russian).
- Mazelis L.S., Solodukhin K.S., Lavrenyuk K.I. (2017) Fuzzy model of socio-economic system development risks analysis on the stakeholder approach basis. *Tyumen State University Herald. Social, Economic, and Law Research*, vol. 3, no. 3, pp. 242–260 (in Russian). <https://doi.org/10.21684/2411-7897-2017-3-3-242-260>
- Dudin M.N., Lyasnikov N.V., Protsenko O.D., Tsvetkov V.A. (2017) Quantification and risk assessment of hydrocarbon resources development projects in the Arctic region. *Tyumen State University Herald. Social, Economic, and Law Research*, vol. 12, no. 4, pp. 168–195 (in Russian). <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2017-4-07>
- Solodukhin K.S. (2019) Fuzzy strategic decision-making models based on formalized strategy maps. *AEBMR-Advances in Economics, Business and Management Research*, vol. 47, Proceedings of the International Scientific Conference “Far East Con” (ISCFEC 2018), pp. 543–547. <https://doi.org/10.2991/iscfec-18.2019.136>
- Micán C., Fernandes G., Araújo M. (2021) Project portfolio risk management: a structured literature review with future directions for research. *International Journal of Information Systems and Project Management*, vol. 8, no. 3, pp. 67–84. <https://doi.org/10.12821/ijispm080304>
- Hofman M., Spalek S., Grela G. (2017) Shedding new light on project portfolio risk management. *Sustainability*, vol. 9, no. 10, pp. 1798–1816. <https://doi.org/10.3390/su9101798>

23. Ghasemi F., Sari M., Yousefi V., Falsafi R., Tamošaitienė J. (2018) Project portfolio risk identification and analysis, considering project risk interactions and using Bayesian networks. *Sustainability*, vol. 10, no. 5, pp. 1609–1631. <https://doi.org/10.3390/su10051609>
24. Guan D., Guo P., Hipel K., Fang L. (2017) Risk reduction in a project portfolio. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 3–22. <https://doi.org/10.1007/s11518-016-5296-2>
25. Benajia K., Kjiri L. (2015) Hybrid approach for project portfolio selection taking account of resources management and interactions between projects. *Journal of Digital Information Management*, vol. 13, no. 6, pp. 451–461.
26. Kleiner G.B., Smolyak S.A. (2000) *Econometric dependencies: methods and principles of construction*. Moscow: Nauka (in Russian).
27. Kettunen J., Salo A. (2017) Estimation of downside risks in project portfolio selection. *Production and Operations Management*, vol. 26, no. 10, pp. 1839–1853. <https://doi.org/10.1111/poms.12727>
28. Mohagheghi V., Mousavi S.M., Vahdani B. (2016) A new multi-objective optimization approach for sustainable project portfolio selection: A real-world application under interval-valued fuzzy environment. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, vol. 13, no. 6, pp. 41–68. <https://doi.org/10.22111/ijfs.2016.2821>
29. Shatalova O.M. (2023) *Efficiency of innovative processes: fuzzy multiple modeling and evaluation in conditions of non-stochastic uncertainty*. Izhevsk: Publishing House of IzhSTU (in Russian).
30. Zaidouni A., Idrissi M.A.J., Bellabdaoui A. (2023) A Sugeno ANFIS model based on fuzzy factor analysis for IS/IT project portfolio risk prediction. *Journal of Information and Communication Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 139–176. <https://doi.org/10.32890/jict2024.23.2.1>
31. Mehlatat M.K., Gupta P., Khan A.Z. (2023) An integrated fuzzy-grey relational analysis approach to portfolio optimization. *Applied Intelligence*, vol. 53, pp. 3804–3835. <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03499-z>
32. Khanjani Shiraz R., Tavana M., Fukuyama H. (2020) A random-fuzzy portfolio selection DEA model using value-at-risk and conditional value-at-risk. *Soft Computing*, vol. 24, pp. 17167–17186. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05010-7>
33. Deng X., Yuan Y. (2021) A novel fuzzy dominant goal programming for portfolio selection with systematic risk and non-systematic risk. *Soft Computing*, vol. 25, pp. 14809–14828. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06226-x>
34. Rahiminezhad Galankashi M., Mokhtab Rafiei F., Ghezelbash M. (2020) Portfolio selection: a fuzzy-ANP approach. *Financial Innovation*, vol. 6, no. 1, pp. 1–34. <https://doi.org/10.1186/s40854-020-00175-4>
35. Mohseny-Tonekabony N., Sadjadi S.J., Mohammadi E., Tamiz M., Jones D.F. (2024) Robust, extended goal programming with uncertainty sets: An application to a multi-objective portfolio selection problem leveraging DEA. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05811-7>
36. Wang B., Li Y., Wang S., Watada J. (2018) A multi-objective portfolio selection model with fuzzy value-at-risk ratio. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 6, pp. 3673–3687. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2842752>
37. Dehghani F. (2023) Simulation of annealing for portfolio selection in mean-pseudo-variance fuzzy model. *SSRN Electronic Journal*, pp. 1–12. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4660934>
38. Nguyen V.D., Duyen N.K., Hai N.M., Duy B.K. (2023) Multicriteria portfolio selection with intuitionistic fuzzy goals as a pseudoconvex vector optimization. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 187, pp. 68–79. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46573-4_7
39. Abtahi S.H. (2023) Uncertain random portfolio optimization based on skew chance distribution. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 44–55. <https://doi.org/10.5391/ijfils.2023.23.1.44>
40. Yang X., Liu W., Chen S., Zhang Y. (2021) A multi-period fuzzy mean-minimax risk portfolio model with investor's risk attitude. *Soft Computing*, vol. 25, pp. 2949–2963. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05351-3>
41. Kleiner G.B. (2008) *Enterprise strategy*. M.: Publishing house “Delo” ANKH (in Russian).
42. Nazarov D.M. (2016) The evaluation model of implicit factors on the basis of fuzzy-set descriptions. *Far Eastern Federal University News*, no. 4(80), pp. 3–17 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.220793>
43. Makarova D.V., Nedoluzhko O.V., Solodukhin K.S. (2024) The role of economic digitization in the development of the organization intellectual capital theory. Proceedings of the X international Scientific and Practical Conference “Intelligent engineering economics and Industry 5.0 (IEEI_5.0_INPROM)”, St. Petersburg, April 25–28 (eds. D.G. Rodionov, A.V. Babkin), pp. 215–219 (in Russian). <https://doi.org/10.18720/IEP/2024.2/50>
44. Cosa M., Pedro E., Urban B. (2024) How to assess the intellectual capital of firms in uncertain times: a systematic literature review and a proposed model for practical adoption. *Journal of Intellectual Capital*, vol. 25, no. 7, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1108/JIC-05-2023-0096>
45. Bustamante A., Liberona D., Ferro R. (2024) Approach to measuring organizational performance from the perspective of intellectual capital. *Communications in computer and information science*, vol. 2152, pp. 73–85. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63269-3_6
46. Kozlovskiy S., Syniehub P., Kozlovskiy A., Lavrov R. (2022) Intellectual capital management of the business community based on the neuro-fuzzy hybrid system. *Neuro-Fuzzy Modeling Techniques in Economics*, vol. 11, no. 11, pp. 25–47. <https://doi.org/10.33111/nfmte.2022.025>
47. Çevik G., Arslan Ö. Analytic evaluation of intellectual capital for ship management companies under a fuzzy environment (2022) *Journal of ETA Maritime Science*, vol. 10, no. 3, pp. 185–194. <https://doi.org/10.4274/jems.2022.41033>
48. Pokrovskaja N., Margulyan Ya., Lvin Yu., Bulatetskaia A. (2020) Neuro-technologies and fuzzy logic for intellectual capital evaluation in education and business. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 940, article 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/940/1/012090>

49. Lucchese M., Aversano N., Di Carlo F., Polcini P.T. (2020) Assessing the intellectual capital and related performance in the teaching process using FES models: First evidence in Italian universities. *WSEAS transactions on business and economics*, vol. 17, pp. 325–344. <https://doi.org/10.37394/23207.2020.17.34>
50. Gross-Gołacka E., Kusterka-Jefmańska M., Jefmański B. (2020) Can elements of intellectual capital improve business sustainability? – The perspective of managers of SMEs in Poland. *Sustainability*, vol. 12, no. 4, article 1545. <https://doi.org/10.3390/su12041545>
51. Zavalin G.S., Nedoluzhko O.V., Solodukhin K.S. (2023) Formation of the causal field of indicators for an organization's intellectual capital development: A concept and a fuzzy economic and mathematical model. *Business Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 53–69. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.53.69>
52. Nedoluzhko O.V., Solodukhin K.S. (2024) Quantitative assessment of university's intellectual capital based on fuzzy model. *University Management: Practice and Analysis*, vol. 28, no. 1, pp. 34–49 (in Russian). <https://doi.org/10.15826/umpa.2024.01.003>
53. Makarova D.V., Nedoluzhko O.V., Solodukhin K.S., Zavalin G.S. (2024) Fuzzy optimization models for intellectual capital enhancing project portfolio selection under risk. *Journal of System and Management Sciences*, vol. 14, no. 7, pp. 1–19. <https://doi.org/10.33168/JSMS.2024.0701>
54. Anshin V.M., Dyomkin I.V., Tsarkov I.V., Nikonov I.M. (2008) On application of fuzzy set theory to the problem of project portfolio selection. *Issues of Risk Analysis*, vol. 5, no. 3, pp. 8–21 (in Russian).
55. Dubois D., Prade H. (1988) *Possibility Theory*. New York: Plenum Press.
56. Wang J., Hwang W.-L. (2007) A fuzzy set approach for R&D portfolio selection using a real option valuation model. *Omega*, vol. 35, no. 3, pp. 247–257.
57. Furnham A., Marks J. (2013) Tolerance of ambiguity: A review of the recent literature. *Psychology*, vol. 4, no. 9, pp. 717–728. <https://doi.org/10.4236/psych.2013.49102>
58. Minaeva Yu.N., Filimonova O.Yu., Minaeva J.I. (2012) Index of fuzziness of fuzzy sets in context of concepts “Data Mining”. *Problems of Informatization and Management*, vol. 3, no. 39, pp. 95–101 (in Russian).
59. Nazarov D.M. (2016) *Methodology of fuzzy set evaluation of implicit factors in organizational activities*. Ekaterinburg: Ural State Economic University Press (in Russian).
60. De Luca A., Termini S. (1972) A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory. *Information and control*, vol. 20, no. 4, pp. 301–312. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(72\)90199-4](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(72)90199-4)
61. Yager R.R. (1979) On the measure of fuzziness and negation. Part I: Membership in the unit interval. *International Journal of General Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 221–229. <https://doi.org/10.1080/03081077908547452>

About the authors

Konstantin S. Solodukhin

Doctor of Sciences (Economics), Professor;

Professor, Mathematics and Modeling Department, Head of Laboratory, Strategic Planning Laboratory, Vladivostok State University, 41, Gogolya Str., Vladivostok 690014, Russia;

E-mail: k.solodukhin@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3619-1219

Georgij S. Zavalin

Head of Department, Data Mining Department, Intern Researcher, Strategic Planning Laboratory, Vladivostok State University, 41, Gogolya Str., Vladivostok 690014, Russia;

E-mail: georgiy.zavalin08@vvsu.ru

ORCID: 0000-0003-4519-0242

Daria V. Makarova

Leading Specialist, Analytical Department, Intern Researcher, Strategic Planning Laboratory, Vladivostok State University, 41, Gogolya Str., Vladivostok 690014, Russia;

E-mail: malnova.daria@vvsu.ru

ORCID: 0009-0002-8207-3010

DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.93.107

Метод оценки стоимости земельного участка в составе единого объекта недвижимости на основе теоретико-игрового подхода*

М.Б. Ласкин 

E-mail: laskin.m@iias.spb.su

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

При массовой оценке рыночной стоимости недвижимого имущества, а также при кадастровой оценке часто возникает задача о справедливом разделении стоимости единого объекта недвижимости на стоимость земельного участка и расположенных на нем улучшений (зданий). Одним из ключевых источников информации при проведении оценки стоимости объектов недвижимого имущества являются рыночные данные. Такие данные могут содержать сведения о ценах предложений, или данные о фактических ценах сделок (например, при сделках с ипотекой) в целом за весь объект. В то же время учетная политика предприятий, разные ставки земельного налога и налога на имущество часто требуют отдельного учета стоимости земельных участков и расположенных на них зданий, сооружений и т.п. Проблема такой разверстки стоимости единых объектов является предметом постоянных дискуссий в оценочном сообществе, устоявшиеся методики отсутствуют. В статье предложен метод справедливого разделения стоимости единого объекта недвижимости, базирующийся на подходе, заимствованном из кооперативной теории игр. Рассмотрена простая игровая постановка задачи и ее справедливое решение, основанное на векторе Шепли. Получены простые и хорошо интерпретируемые расчетные формулы, позволяющие провести разверстку рыночной стоимости единых объектов на больших массивах данных с минимальными временными затратами. Предложенный метод в теории и практике оценки является новым.

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

Ключевые слова: единый объект недвижимости, вектор Шепли, множественная линейная регрессия, логарифмически нормальное распределение цен, разверстка стоимости объекта недвижимости

Цитирование: Ласкин М.Б. Метод оценки стоимости земельного участка в составе единого объекта недвижимости на основе теоретико-игрового подхода // Бизнес-информатика. 2025. Т. 19. № 1. С. 93–107. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.93.107

Введение

Одной из актуальных задач оценки недвижимого имущества, в особенности при кадастровой оценке, является проблема разверстки оценочной стоимости единого объекта недвижимости¹ (ЕОН) на доли стоимости земельного участка (ЗУ) и улучшений на нем (зданий, сооружений и т.п.). Подробное описание возникающих в оценочной практике ситуаций, требующих такого разделения, дано в [1].

В [1] в качестве одного из методов разделения оценочной стоимости ЕОН на долю земельной составляющей и долю зданий предлагается методология (вектор Шепли), заимствованная из теории игр. Следует отметить, что применению вектора Шепли в машинном обучении уделяется достаточно большое внимание со стороны исследователей различных прикладных областей (см., например [2–7]). В том числе для оценки степени влияния факторов в линейной регрессионной модели [8–9]. В работе [10] рассматривается приложение модели множественной линейной регрессии и вектора Шепли при исследовании соотношения между стоимостями земли и зданий на примере рыночных данных в г. Монреале.

В настоящей статье рассматривается подход к решению задачи разверстки оценочной стоимости ЕОН, вытекающий из идеологии применения вектора Шепли. В этом случае целевой переменной является оценка стоимости ЕОН, а ценообразующими факторами² площадь ЗУ и площадь улучшений на нем (зданий и сооружений).

1. Постановка задачи

Введем обозначения:

V – цена предложения (или сделки) за ЕОН;

SB – площадь улучшений в составе ЕОН;

SP – площадь земельного участка в составе ЕОН.

Предположим, что имеется n наблюдений в виде трехмерных векторов (V_i, SP_i, SB_i) , $i = \overline{1, n}$ и удалось построить некоторую оценочную функциональную зависимость $Y = f(sp, sb)$, в некотором смысле наилучшим образом отражающую связь между целевой переменной и факторами (под Y будем понимать оценку стоимости ЕОН, под sp, sb – фиксированные значения площади ЗУ и улучшений, соответственно). Оценку по формуле $Y = f(sp, sb)$ будем рассматривать как результат совокупного влияния факторов SP, SB при заданных значениях $SP = sp, SB = sb$, а функции $Y_1 = f_1(sp)$ и $Y_2 = f_2(sb)$ – как результат построения оценок по каждому из факторов по отдельности, на тех же исходных данных, что и $Y = f(sp, sb)$.

Требуется построить модель зависимости общей стоимости объекта и распределить стоимость между земельным участком и улучшениями, с применением некоторого критерия справедливости.

2. Метод решения (построение вектора Шепли)

В нашем случае рассматриваются всего два фактора. Площадь ЗУ и площадь улучшений. В терминах теории игр – простейшая кооперативная игра с двумя участниками (о теории игр см., например, [11, 12]). Вектор Шепли в данном случае представ-

¹ Под единым объектом недвижимости понимается объект, в состав которого входит земельный участок и расположенные на нем здания, сооружения.

² В линейной регрессионной модели может участвовать большее количество факторов. В настоящей статье рассматриваются два указанных фактора, поскольку проблема заключается в распределении стоимости ЕОН только между этими двумя факторами.

ляет собой некоторое оптимальное распределение стоимости, где вклад ЗУ и улучшений в общую стоимость равен среднему вкладу по всем возможным «коалициям». Возможных коалиций – всего две (*sp, sb*) и (*sb, sp*). Построим таблицу значений «функции выигрыша», расчета вектора Шепли и долей, которые следует отнести на стоимость ЗУ и улучшений (*табл. 1*).

Для переноса игрового подхода к решению задачи разверстки оценочной стоимости ЕОН должны выполняться следующие условия:

1. Эффективность.
2. Аддитивность по коалициям.
3. Симметричность.
4. Факторы, не влияющие на результат, не участвуют в модели (в игровой терминологии «аксиома болвана»).

Мы рассматриваем оценку ЕОН, т.е. у объекта есть ненулевая площадь здания и ненулевая площадь земельного участка. Следовательно, $Y_1 > 0$, $Y_2 > 0$. Неравенства $Y > Y_1$, $Y > Y_2$ обеспечивают выполнение условий эффективности и аддитивности (по коалициям). Выполнение третьего и четвертого условия обеспечено условиями задачи: в обучающей модели нет одинаковых факторов; факторы, не влияющие на результат, отсутствуют.

Выполнение условий, $Y_1 > 0$, $Y_2 > 0$, $Y > Y_1$, $Y > Y_2$ обеспечивает существование ядра, следовательно

Таблица 1.

Расчет доли земельной составляющей и доли на здания в оценке ЕОН с помощью вектора Шепли

Коалиции/факторы	<i>sp</i>	<i>sb</i>
(<i>sp, sb</i>)	Y_1	$Y - Y_1$
(<i>sb, sp</i>)	$Y - Y_2$	Y_2
Среднее по коалициям (вектор Шепли)	$\frac{Y + Y_1 - Y_2}{2}$	$\frac{Y - Y_1 + Y_2}{2}$
Доля на землю / доля на улучшения (здание)	$\frac{Y + Y_1 - Y_2}{2 \cdot Y}$	$\frac{Y - Y_1 + Y_2}{2 \cdot Y}$

наличие дележа и существования вектора Шепли, как единственного справедливого дележа.

Невыполнение условия $Y > Y_1$ ($Y \leq Y_1$) означает, что оценка ЕОН только по первому фактору «площадь ЗУ» дает величину не меньшую, чем оценка по двум факторам. В этом случае улучшения в составе ЕОН имеют отрицательную или нулевую стоимость.

Невыполнение условия $Y > Y_2$ ($Y \leq Y_2$) означает, что оценка ЕОН только по второму фактору «площадь улучшений» дает величину не меньшую, чем оценка по двум факторам. В этом случае ЗУ в составе ЕОН³, имеет отрицательную или нулевую стоимость.

Расчет доли стоимости ЗУ и улучшений в составе ЕОН, показанный в *таблице 1* не зависит от модели, по которой оценивалась стоимость ЕОН. В то же время подбор модели может зависеть от того, как устроены рыночные данные. В терминах теоретико-игровой постановки это означает, что отдельной частью исследования является подбор характеристической функции, т.е. функции, которая формирует правило «выигрыша».

3. Построение характеристической функции

Следует отметить, что выбор характеристической функции существенно влияет на результат расчетов. В некоторых случаях удается получить модель вида

$$V = a + b \cdot sp + c \cdot sb \tag{1}$$

с удовлетворительными показателями качества.

В этом случае Y_1 и Y_2 ищем в виде $Y_1 = a_1 + b_1 \cdot sp$ и $Y_2 = a_2 + c_2 \cdot sb$.

Доля на ЗУ равна

$$\frac{Y + Y_1 - Y_2}{2 \cdot Y} = \frac{1}{2} + \frac{a_1 - a_2 + b_1 \cdot sp - c_2 \cdot sb}{2 \cdot (a + b \cdot sp + c \cdot sb)},$$

доля на улучшения равна

$$\frac{Y - Y_1 + Y_2}{2 \cdot Y} = \frac{1}{2} + \frac{a_2 - a_1 - b_1 \cdot sp + c_2 \cdot sb}{2 \cdot (a + b \cdot sp + c \cdot sb)}.$$

³ Следует отметить, что свободный (или условно свободный) ЗУ и ЗУ в составе ЕОН являются разными типами недвижимого имущества. Для свободных (условно свободных) ЗУ предполагается существование оборота на рынке недвижимого имущества. Оборот ЗУ, находящихся в составе ЕОН, как отдельных участков отсутствует.

Формализованное представление в виде игры. Предположим, что двое играют в такую игру: первый игрок выбирает величину sp и получает выигрыш Y_1 , второй выбирает величину sb и получает выигрыш Y_2 ; если они объединяются в коалицию, то получают на двоих выигрыш $Y = V$. Условия существования «дележа»

$$Y_1 > 0, Y_2 > 0, Y > Y_1, Y > Y_2,$$

зависят от знаков коэффициентов линейных регрессионных моделей. Как распределить выигрыш, если он существует, между игроками (в нашей предметной области между ЗУ и улучшениями)?

В задачах оценки недвижимого имущества модель вида (1) часто оказывается неприменимой из-за несимметричных распределений величин V, sp, sb и, следовательно, несимметричного распределения ошибок линейной регрессионной модели. В работе [13] показано, что распределения цен, образованных последовательными сравнениями, сходятся к логарифмически нормальному распределению. На этот же факт указывали авторы [14, 15]. Часто такому же распределению подчиняются площади улучшений (см., например, [16]). Такую же тенденцию имеют и площади ЗУ. Следует отметить, что для ЗУ распределение площадей в отдельных секторах рынка может не подтверждаться статистическими тестами из-за большого количества объектов сравнения одинаковой площади (например, дачные поселки, образованные в советский период). При допущении, что величины V, sp, sb распределены совместно логарифмически нормально⁴, линейная модель может быть рассмотрена в виде:

$$\ln(V) = a + b \cdot \ln(sp) + c \cdot \ln(sb), \quad (2)$$

а общая модель задачи в виде:

$$V = e^a \cdot sp^b \cdot sb^c. \quad (3)$$

В этом случае Y_1 и Y_2 ищем в виде

$$\ln(Y_1) = a_1 + b_1 \cdot \ln(sp) \text{ и } \ln(Y_2) = a_2 + c_2 \cdot \ln(sb) \quad (4)$$

и получаем

$$Y = e^a \cdot sp^b \cdot sb^c, Y_1 = e^{a_1} \cdot sp^{b_1}, Y_2 = e^{a_2} \cdot sb^{c_2}$$

Доля на ЗУ равна

$$\frac{Y + Y_1 - Y_2}{2 \cdot Y} = \frac{1}{2} + \frac{e^{a_1} \cdot sp^{b_1} - e^{a_2} \cdot sb^{c_2}}{2 \cdot e^a \cdot sp^b \cdot sb^c},$$

доля на улучшения равна

$$\frac{Y - Y_1 + Y_2}{2 \cdot Y} = \frac{1}{2} - \frac{e^{a_1} \cdot sp^{b_1} - e^{a_2} \cdot sb^{c_2}}{2 \cdot e^a \cdot sp^b \cdot sb^c}. \quad (5)$$

Условия для существования «дележа»: $Y_1 > 0, Y_2 > 0$ выполняются, для выполнения условий $Y > Y_1, Y > Y_2$ должны выполняться неравенства, зависящие от моделей (3) и (4)

$$e^a \cdot sp^b \cdot sb^c > e^{a_1} \cdot sp^{b_1} \text{ и } e^a \cdot sp^b \cdot sb^c > e^{a_2} \cdot sb^{c_2},$$

которые на плоскости (sp, sb) дают область, ограниченную условиями

$$sb > e^{\frac{a_1 - a}{c}} \cdot sp^{\frac{b_1 - b}{c}} \text{ и } sp > e^{\frac{a_2 - a}{b}} \cdot sb^{\frac{c_2 - c}{b}}. \quad (6)$$

Как будет показано ниже, могут быть и комбинированные модели. Данные могут быть устроены таким образом, что для величин Y, Y_1, Y_2 будут построены модели разного типа. В любом случае принцип построения вектора Шепли (табл. 1) не изменится.

При оценке рыночной стоимости долей ЗУ и улучшений в составе ЕОН вполне может оказаться, что либо свободный ЗУ, либо дом на нем может быть оценен дороже, чем ЕОН. Такие ситуации хорошо интерпретируются: в первом случае здание ухудшает ЗУ по сравнению со свободным (условно свободным) ЗУ, во втором случае улучшения оцениваются настолько дорого, что ЗУ (в составе ЕОН) по сравнению с ними ничего не стоит или имеет отрицательную стоимость. При кадастровой оценке такая интерпретация невозможна – кадастровый оценщик в любом случае обязан назначить какую-то положительную кадастровую стоимость и ЗУ, и улучшениям. В то же время кадастровую оценку, выполняемую методами массовой оценки следует проводить как рыночную [17]. Для целей кадастровой оценки величины Y_1, Y_2 модифицируем следующим образом

$$Y_1 = \begin{cases} f_1(sp), & \text{если } f_1(sp) < Y \\ Y = f(sp, sb), & \text{если } f_1(sp) \geq Y, \end{cases}$$

⁴ В любом случае, часто оказывается, что логарифмирование несимметрично распределенных цен позволяет перейти к построению линейной модели в логарифмах, для которой выполняются условия теоремы Гаусса-Маркова.

$$Y_2 = \begin{cases} f_2(sb), & \text{если } f_2(sb) < Y \\ Y = f(sp, sb), & \text{если } f_2(sb) \geq Y. \end{cases} \quad (7)$$

Такой выбор Y_1, Y_2 , позволит получить положительные кадастровые стоимости как для ЗУ, так и для улучшений.

4. Концепция информационного обеспечения кадастровых управлений при расчетах кадастровых стоимостей ЗУ и зданий входящих в состав единых объектов недвижимости

Предложенный выше подход легко реализуется в таких средах как Python, статистический пакет R. Их преимуществом является открытость и доступность любому пользователю. Любой оценщик (исследователь), заинтересованный в применении современных методов работы с большими объемами данных, может самостоятельно освоить необходимый набор навыков для получения качественных аналитических результатов. В кадастровых управлениях имеются собственные базы данных, с которыми результаты расчетов легко сопрягаются, так как все они могут быть выгружены из специализированных пакетов в нужных форматах (как правило, файлы с расширением .csv). Практическая реализация предложенного выше метода может быть представлена блок-схемой, показанной на *рисунке 1*.

Несложный программный код в среде, например, статистического пакета R позволяет не только рассчитать доли стоимости для конкретного объекта, но и создавать таблицы (даже справочные таблицы, при условии тщательного отбора данных по времени и локации) и встраивать в кадастровые базы данных результаты таких расчетов.

Рассмотрим на примере, в котором используются данные из статьи [1] и предоставленные ее авторами (источники первичных данных сайты krasnodar.cian.ru, avito.ru). Общее число наблюдений (объектов сравнения) в статье [1] – 49, из них 39 объектов – ЕОН, остальные 10 – свободные земельные участки. Регион – г. Краснодар, вид разрешенного использования – индивидуальное жилое строительство. Данные представлены в *таблице 2*. Расчеты выполнялись в статистическом пакете R (читателям, не знакомым с R могут быть рекомендованы книги [18, 19]).

Прежде всего, следует отметить, что свободные (условно свободные) ЗУ и ЗУ в составе ЕОН – разные виды недвижимости. Для первых объектов существует рынок, на котором обращаются свободные ЗУ. Для вторых – рынка нет, ЗУ в составе ЕОН не продаются отдельно от зданий, сооружений, находящихся на них, они могут быть проданы только в совокупности с улучшениями. Для построения общей модели $Y = f(sp, sb)$ используем данные по 39 объектам ЕОН. Для построения модели $Y_1 = f_1(sp)$ используем данные по свободным ЗУ, для построения модели $Y_2 = f_2(sb)$ используем данные по ЕОН, так как в них есть улучшения.

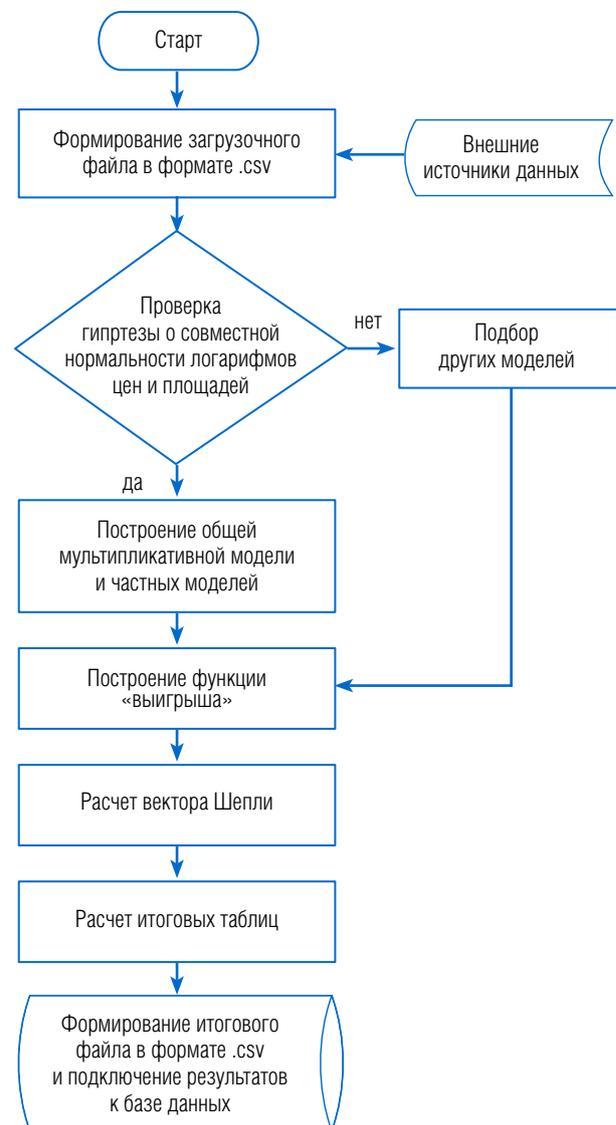


Рис. 1. Блок-схема программного кода для расчета долей стоимостей ЗУ и зданий, входящих в состав ЕОН.

Таблица 2.

Данные о площадях ЗУ, зданий и ценах объектов сравнения

№	Площадь ЗУ, кв. м	Площадь улучшений (здания), кв. м	Цена, млн руб.	№	Площадь ЗУ, кв. м	Площадь улучшений (здания), кв. м	Цена, млн руб.
1	650,0	80,0	18,6	26	600,0	300,0	47,0
2	500,0	242,0	30,0	27	215,0	0,0	4,0
3	1120,0	720,0	78,0	28	700,0	145,0	16,0
4	580,0	300,0	65,0	29	280,0	97,1	12,5
5	120,0	62,8	6,5	30	600,0	36,0	10,0
6	580,0	49,0	3,1	31	520,0	0,0	12,0
7	800,0	370,0	125,0	32	420,0	50,0	8,8
8	500,0	0,0	15,0	33	450,0	84,0	6,3
9	215,0	123,6	7,0	34	220,0	150,0	12,0
10	640,0	260,0	16,0	35	500,0	84,0	3,9
11	383,0	43,0	9,9	36	450,0	100,0	18,5
12	600,0	50,0	7,8	37	900,0	0,0	35,0
13	616,0	149,0	18,0	38	200,0	160,0	12,0
14	707,0	0,0	8,0	39	314,0	66,3	11,0
15	400,0	90,0	10,0	40	454,0	90,0	9,5
16	300,0	90,0	6,4	41	850,0	0,0	25,0
17	600,0	160,0	19,3	42	300,0	88,0	7,8
18	2330,0	0,0	90,0	43	100,0	50,0	2,5
19	360,0	270,0	25,4	44	490,0	91,0	15,0
20	450,0	85,7	10,5	45	400,0	0,0	14,0
21	350,0	150,0	6,3	46	500,0	0,0	10,0
22	613,0	0,0	23,0	47	400,0	108,0	4,6
23	200,0	56,3	7,5	48	460,0	120,0	17,0
24	700,0	350,0	47,0	49	150,0	44,0	3,0
25	860,0	106,8	6,5				

Построение линейной регрессионной модели по двум факторам не дает удовлетворительной модели (табл. 3). Наблюдается явная асимметрия ошибок, два коэффициента модели имеют неудовлетворительные значения t -критерия Стьюдента.

Линейная регрессионная модель, построенная для логарифмов переменных, напротив, дает приемлемый результат (табл. 4).

Для изучаемого сектора недвижимости получили модель (характеристическую функцию) вида:

$$V = e^a \cdot sp^b \cdot sb^c = e^{-4,1812} \cdot sp^{0,4246} \cdot sb^{0,8739}. \quad (8)$$

Подставляя в формулу (8) фиксированные значения sp и sb получаем оценку стоимости ЕОН.

Для построения модели только по площади ЗУ выберем 10 свободных ЗУ из исходного набора данных. Для этого множества удастся построить удовлетворительную линейную регрессионную модель (табл. 5), логарифмирование в этом случае не дало лучшей модели.

Получаем

$$a_1 = -7,5822, b_1 = -0,0413, \\ Y_1 = -7,5822 + 0,0413 \cdot sp.$$

Для построения модели только по площади улучшений используем только те объекты, у которых есть здания (их 39). Для этого множества построить удовлетворительную регрессионную модель удастся только для логарифмов (табл. 6).

Таблица 3.

Результаты, полученные с применением библиотечной функции $lm()$ статистического пакета R для линейной регрессионной модели вида (1)

Модель: $V = a + b \cdot sp + c \cdot sb$					
Распределение ошибок:	Минимум	1 квартиль	Медиана	3 квартиль	Максимум
	-26,59	-4,96	-1,15	3,91	71,34
Оценки коэффициентов:	Оценка	Стандартное отклонение	Значение t -критерия	p -value t -критерия Стьюдента	
a	-7,191	5,677	-1,267	0,213	<0,05
b	0,015	0,014	1,075	0,289	<0,05
c	0,132	0,023	5,609	0	<0,05
RSE	14,67				
R^2	0,646	корр. R^2	0,626		
Значение F -критерия Фишера	32,81	p -value критерия Фишера	0		

Таблица 4.

Результаты, полученные с применением библиотечной функции $lm()$ статистического пакета R для модели в логарифмах вида (2)

Модель: $\ln(V) = a + b \cdot \ln(sp) + c \cdot \ln(sb)$					
Распределение ошибок:	Минимум	1 квартиль	Медиана	3 квартиль	Максимум
	-0,969	-0,237	0,007	0,351	0,351
Оценки коэффициентов:	Оценка	Стандартное отклонение	Значение t -критерия	p -value t -критерия Стьюдента	
a	-4,181	0,921	-4,538	0	<0,05
b	0,425	0,170	2,500	0,017	<0,05
c	0,874	0,132	6,641	0	<0,05
RSE	0,5				
R^2	0,7	корр. R^2	0,682		
Значение F -критерия Фишера	41,83	p -value критерия Фишера	0		

Получаем

$$a_2 = -2,3443, c_2 = 1,0262, Y_2 = e^{-2,3443 \cdot sb^{1,0262}}$$

Доля на землю равна $\frac{Y + Y_1 - Y_2}{2}$, доля на здание равна $\frac{Y - Y_1 + Y_2}{2}$.

Пусть $sb = 300, sp = 600$, тогда получаем:

$$Y = V = e^{-4,1812 \cdot 600^{0,4246} \cdot 300^{0,8739}} = 35,833 \text{ (млн руб.)},$$

$$Y_1 = -7,5822 + 0,0413 \cdot 600 = 17,198 \text{ (млн руб.)},$$

$$Y_2 = e^{-2,3443 \cdot 300^{1,0262}} = 33,412 \text{ (млн руб.)}.$$

Доля на землю равна

$$\frac{Y + Y_1 - Y_2}{2 \cdot Y} = \frac{35,833 + 17,198 - 33,412}{2 \cdot 35,833} \approx 27\%,$$

доля на здание равна

$$\frac{Y - Y_1 + Y_2}{2 \cdot Y} \approx 73\%$$

или в рублях $35,833 \cdot 27\% \approx 9,675$ (млн руб.) на ЗУ и $35,833 \cdot 73\% \approx 26,158$ (млн руб.) на улучшения.

Таким образом, общая оценочная стоимость ЕОН с ЗУ 6 соток (600 кв. м) и домом на нем, площадью 300 кв. м составляет 35,833 млн руб., из которых 9,675 млн руб. следует отнести на стоимость ЗУ, а 26,158 млн руб. на стоимость дома. Аналогичным образом могут быть рассчитаны доли, которые следует отнести на ЗУ и улучшения при любых значениях sb, sp . В таблице 2 представлены рассчитанные доли стоимости ЗУ в составе ЕОН

Таблица 5.

**Результаты, полученные с применением
библиотечной функции $lm()$ статистического пакета R
для одномерной линейной регрессионной модели вида (4)**

Модель: $V = a_1 + b_1 \cdot sp$					
Распределение ошибок:	Минимум	1 квартиль	Медиана	3 квартиль	Максимум
	-13,642	-2,393	1,343	4,49	5,39
Оценки коэффициентов:	Оценка	Стандартное отклонение	Значение t -критерия	p -value t -критерия Стьюдента	<0,05
a_1	-7,582	3,243	-2,338	0,047	
b_1	0,041	0,003	11,867	0	
RSE	6,117				
R^2	0,947	корр. R^2	0,941		
Значение F -критерия Фишера	143,2	p -value критерия Фишера	0		

Таблица 6.

**Результаты, полученные с применением
библиотечной функции $lm()$ статистического пакета R
для одномерной модели в логарифмах вида (4)**

Модель: $\ln(V) = a_2 + c_2 \cdot \ln(sb)$					
Распределение ошибок:	Минимум	1 квартиль	Медиана	3 квартиль	Максимум
	-0,957	-0,398	0,029	0,362	1,104
Оценки коэффициентов:	Оценка	Стандартное отклонение	Значение t -критерия	p -value t -критерия Стьюдента	<0,05
a_2	-2,344	0,594	-3,945	0	
c_2	1,026	0,125	8,233	0	
RSE	0,532				
R^2	0,647	корр. R^2	0,637		
Значение F -критерия Фишера	67,78	p -value критерия Фишера	0		

при различных sb , sp . Доли улучшений составляют разницу между 100% и значениями в таблице 7.

В таблице 7 незаполненные поля соответствуют двум случаям:

- ♦ стоимость улучшений доминирует над стоимостью ЗУ настолько, что ЗУ в составе ЕОН имеет расчетную отрицательную стоимость (левый нижний угол таблицы);
- ♦ стоимость ЗУ доминирует над стоимостью улучшений настолько, что улучшения уменьшают стоимость ЗУ в составе ЕОН, по сравнению со стоимостью свободного ЗУ (правый верхний угол таблицы).

5. Дополнительное обоснование модели и область изменения факторов

Модель совместного влияния факторов на стоимость ЕОН вида $V = e^a \cdot sp^b \cdot sb^c$ построена как модель множественной линейной регрессии в логарифмах. Для ее построения было достаточно прологарифмировать факторы и целевую переменную и подобрать уравнение регрессии. В целом модель обладает удовлетворительными статистическими показателями (табл. 4), но имеет стандартное отклонение $RSE = 0,4979$, указывающее на заметное рассеяние наблюдений. Проверка логарифмов наблюдений (V_i, SP_i, SB_i), $i = 1, n$ на совместную нор-

Таблица 7.

Доли стоимости ЗУ в составе ЕОН

		Площадь земельного участка, кв. м							
		200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Площадь улучшений, кв. м	20	15%							
	60		68%						
	100		41%	75%					
	140		28%	56%	76%	93%			
	180		20%	44%	62%	76%	88%	99%	
	220		15%	36%	52%	65%	76%	85%	94%
	260		10%	30%	45%	57%	66%	75%	83%
	300		7%	26%	40%	50%	59%	67%	74%
	340		4%	22%	35%	45%	54%	61%	68%
	380		2%	19%	32%	41%	49%	56%	63%
	420			17%	29%	38%	46%	52%	58%
	460			15%	26%	35%	43%	49%	54%
	500			13%	24%	33%	40%	46%	51%
	540			11%	22%	30%	37%	43%	48%
	580			10%	20%	29%	35%	41%	46%
	620			8%	19%	27%	33%	39%	44%
	660			7%	17%	25%	32%	37%	42%
	700			6%	16%	24%	30%	35%	40%
740			5%	15%	23%	29%	34%	39%	
780			4%	14%	21%	27%	33%	37%	

мальность может служить дополнительным аргументом в пользу этой модели (о совместной нормальности см., например, [20]). В таблице 8 показан результат теста Мардиа (библиотека *MVN* статистического пакета R).

Библиотека *MVN* статистического пакета R (подробное описание см. [21, 22]), кроме теста Мардиа, содержит и другие тесты совместной нормальности, такие как тесты Ройстона, Хенце–Цирклера, Дорник–Хансена и другие, которые для этих данных также дают положительные результаты. Таким образом, мы имеем приемлемые обоснования для выбора модели, пусть и с заметным стандартным отклонением (разбросом) данных. Аналогичные

подтверждения можно получить и для парных наблюдений (SP_i, SB_i) , $i = 1, n$.

Регрессионные модели широко распространены в оценочной литературе (см., например, [23–25]). Автор статьи [26] указывает на причины, по которым не рекомендуется распространять действие регрессионных моделей за пределы области наблюдений. На рисунке 2 показаны наблюдавшиеся 39 значений пар: площадь ЗУ – площадь улучшений.

Кривая линия на рисунке 2 – линия 90% уровня модельного логарифмически нормального распределения площадей ЗУ и площадей улучшений. Прямая линия – биссектриса первого координатного угла. Выше биссектрисы располагаются слу-

Таблица 8.

**Результат теста Мардиа на совместную нормальность
логарифмов исходных данных**

Тест Мардиа на совместную нормальность										
Тест:	Статистика теста	<i>p</i> -value теста	Результат (ДА – «+», НЕТ – «-»)							
Тест Мардиа асимметрия	16,31	0,091	ДА							
Тест Мардиа эксцесс	-0,458	0,647	ДА							
Тест Мардиа совместная нормальность			ДА							
Тесты маргинальных распределений (компонент) на нормальность	Компонента	Статистика теста	<i>p</i> -value теста	Результат						
Тест Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса	Компонента 1	0,121	0,161	ДА						
Тест Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса	Компонента 2	0,131	0,087	ДА						
Тест Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса	Компонента 3	0,11	0,27	ДА						
Описание выборки										
Номер компоненты	Объем выборки	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана	Минимум	Максимум	1 квартиль	3 квартиль	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
1	39	2,497	0,884	2,351	0,912	4,828	1,909	2,904	0,621	0,139
2	39	6,018	0,537	6,109	4,605	5,726	5,727	6,397	-0,752	0,129
3	39	4,718	0,692	4,575	3,584	4,288	4,288	5,043	0,569	-0,259

чай, когда площадь улучшений больше площади ЗУ. Как правило, предполагается, что для ИЖС площадь улучшений не превышает площади ЗУ, однако такие случаи возможны и, как видно из *рисунка 2*, построенная модель это допускает. Однако, в нашем двумерном случае, применение модели лучше ограничить областью, находящейся внутри замкнутой кривой на *рисунке 2*. Сравнение *таблицы 7* и *рисунка 2* показывает, что доли стоимости ЗУ рассчитаны для этой области. В то же время в *таблице 7* остаются незаполненные поля, которые имеют интерпретацию (см. выше) с точки зрения определения долей ЗУ и улучшений в рыночной стоимости ЕОН. При кадастровой оценке для любой комбинации площадей ЗУ (*sp*) и улучшений (*sb*) должна быть указана кадастровая стоимость как положительная величина, и при этом, в целом кадастровая стоимость должна быть оценена как

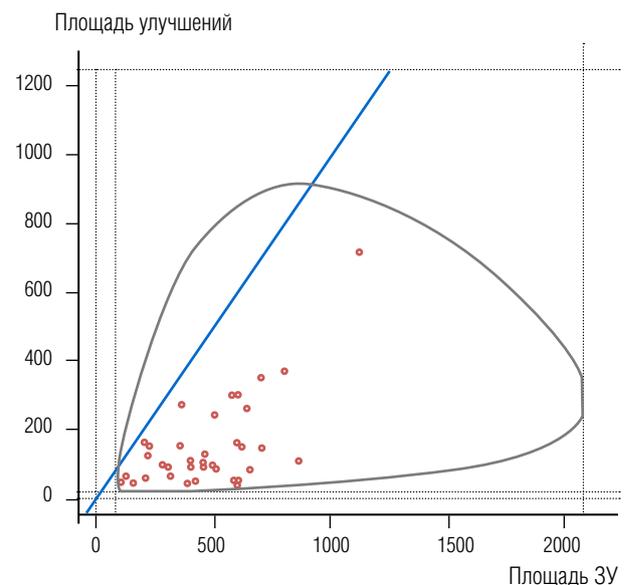


Рис. 2. Диаграмма рассеяния наблюдавшихся пар (SP_i, SB_i) , $i = \overline{1, n}$.

рыночная или близко к ней. Именно такое понимание кадастровой стоимости сводит к минимуму возможные претензии к кадастровой оценке. Что делать? В этом случае надо задать Y_1 и Y_2 так, чтобы он не превосходили Y при любой комбинации площадей ЗУ (sp) и улучшений (sb). Например,

$$Y = V = e^a \cdot sp^b \cdot sb^c = e^{-4,1812} \cdot sp^{0,4246} \cdot sb^{0,8739},$$

$$Y_1 = \begin{cases} -7,5822 + 0,0413 \cdot sp, & \text{если } -7,5822 + 0,041 \cdot sp < Y \\ Y, & \text{если } -7,5822 + 0,0413 \cdot sp \geq Y, \end{cases}$$

$$Y_2 = \begin{cases} e^{-2,3443} \cdot sb^{1,0262}, & \text{если } e^{-2,3443} \cdot sb^{1,0262} < Y \\ Y, & \text{если } e^{-2,3443} \cdot sb^{1,0262} \geq Y. \end{cases}$$

Такие условия легко реализуются в скрипте статистического пакета R и для них могут быть рассчитаны доли ЗУ и улучшений в составе ЕОН и их денежные выражения. Таблица долей для кадастровой стоимости ЗУ в составе ЕОН приведена в *таблице 9*.

Доли ЗУ (аналогично, доли улучшений, как дополнение до 100%) в *таблице 9* удовлетворяют задачам кадастровой оценки – стоимости всех ЗУ и зданий, находящихся на них будут положительными, в сумме совпадающие с расчетной модельной стоимостью ЕОН. Доли ЗУ в *таблице 9* приблизительно соответствуют долям ЗУ в *таблице 7* в основной, самой важной части таблиц, соответствующей области наблюдений на *рисунке 2* (выделено жирным

Таблица 9.

Доля стоимости ЗУ в составе ЕОН для кадастровых целей

		Площадь земельного участка, кв. м							
		200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Площадь улучшений, кв. м	20	17%	61%	67%	71%	74%	76%	77%	78%
	60	7%	54%	61%	66%	69%	71%	73%	74%
	100	4%	41%	58%	63%	66%	69%	71%	72%
	140	3%	31%	56%	61%	65%	67%	69%	71%
	180	3%	25%	44%	59%	63%	66%	68%	70%
	220	2%	21%	36%	52%	62%	65%	67%	69%
	260	2%	18%	30%	45%	57%	64%	66%	68%
	300	2%	16%	26%	40%	50%	59%	65%	67%
	340	1%	14%	23%	35%	45%	54%	61%	67%
	380	1%	13%	21%	32%	41%	49%	56%	63%
	420	1%	12%	19%	29%	38%	46%	52%	58%
	460	1%	11%	18%	26%	35%	43%	49%	54%
	500	1%	10%	16%	24%	33%	40%	46%	51%
	540	1%	9%	15%	22%	30%	37%	43%	48%
	580	1%	9%	14%	20%	29%	35%	41%	46%
	620	1%	8%	14%	19%	27%	33%	39%	44%
	660	1%	8%	13%	17%	25%	32%	37%	42%
	700	1%	7%	12%	16%	24%	30%	35%	40%
740	1%	7%	12%	15%	23%	29%	34%	39%	
780	1%	7%	11%	14%	21%	27%	33%	37%	

шрифтом), т.е. оценка доли рыночной стоимости в этих полях примерно соответствует кадастровой. Расхождения проявляются по мере сдвига в левый нижний угол и в правый верхний угол. Это области, где кадастровый оценщик обязан назначить положительную кадастровую стоимость, в любом случае, даже если назначенная кадастровая стоимость отличается от оценки доли рыночной стоимости. Слева внизу уменьшается доля стоимости ЗУ в составе ЕОН, справа сверху уменьшается доля стоимости улучшений в составе ЕОН.

Заключение

Земельные участки в составе ЕОН и свободные (или условно свободные) земельные участки относятся к разным типам недвижимого имущества. ЗУ в составе ЕОН не обращаются на рынке без улучшений, расположенных на них, их рыночная стоимость может быть получена только в результате разверстки стоимости ЕОН. Свободные земельные участки обращаются на рынке недвижимого имущества, для них могут быть подобраны объекты сравнения и оценена рыночная стоимость как сравнительным, так и доходным подходом.

Вектор Шепли позволяет определить справедливое распределение долей стоимости ЗУ и улучшений в составе ЕОН.

При оценке рыночной стоимости долей ЗУ и улучшений в составе ЕОН могут быть получены отрицательные стоимости ЗУ и улучшений. В первом случае стоимость улучшений больше стоимости ЕОН (ЗУ в составе ЕОН имеет отрицательную стоимость), во втором случае стоимость ЗУ больше стоимости ЕОН (здания ухудшают земельный участок в составе ЕОН по сравнению со свободным ЗУ).

При определении кадастровой стоимости, ЗУ и улучшения на нем в составе ЕОН должны иметь положительную стоимость. Предложенная методика, основанная на векторе Шепли и соответствующем подборе характеристической функции, позволяет провести разделение стоимости ЕОН на стоимости ЗУ и улучшений, в основном соответствующее рыночной стоимости. Расхождения с рыночной стоимостью проявляются только в редких случаях, отстоящих от области наблюдений и только за счет специальных требований, предъявляемых к кадастровой стоимости (база для налогообложения и учета). Именно эти случаи являются иллюстрацией различий между кадастровой и рыночной стоимостями.

Предложенный метод позволяет получить данные из кадастровых баз, внешних источников, выполнить расчеты в специализированной среде и выгрузить результаты расчетов в форматах, легко встраиваемых в кадастровые базы данных. ■

Литература

1. Кузнецов Д.Д., Мягков В.Н. Земля – отдельно, здание – отдельно. Как решить задачу разверстки рыночной стоимости залогового объекта // Банковское кредитование. 2023. № 6(112). С. 60–76.
2. Bure V.M., Staroverova K.Yu. Applying cooperative games with coalition structure for data clustering // Automation and Remote Control. 2019. Vol. 80. No. 8. P. 1541–1551.
3. The Shapley value in machine learning / B. Rozemberczki [et al.] // arXiv:2202.05594v2. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.05594>
4. Roth J., Bajorath J. Machine learning models with distinct Shapley value explanations decouple feature attribution and interpretation for chemical compound predictions // Cell Reports Physical Science. 2024. Vol. 5. No. 8. P. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102110>
5. Shapley value: from cooperative game to explainable artificial intelligence / M. Li [et al.] // Autonomous Intelligent Systems. 2024. Vol. 4. Article 2. <https://doi.org/10.1007/s43684-023-00060-8>
6. Integrating Shapley values into machine learning techniques for enhanced predictions of hospital admissions / G. Feretzakis [et al.] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14(13). Article 5925. <https://doi.org/10.3390/app14135925>
7. Kjersti A., Jullum M., Loland A. Explaining individual predictions when features are depended: More accurate approximations to Shapley values // arXiv:1903.10464v3. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.10464>
8. Михеенко А.М., Савич Д.С. Применение вектора Шепли в регрессионном анализе // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2020. № 2. С. 84–94.
9. Lundberg S.M., Allen P.G. A unified approach to interpreting model predictions // ArXiv:1705.07874v2. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>

10. Özdilek Ü. Land and building separation based on Shapley values // Palgrave Communications. 2020. Vol. 6. Article 68. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-0444-1>
11. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр. М.: Высшая школа, Книжный дом «Университет», 1998.
12. Мазалов В.В. Математическая теория игр и приложения. Санкт-Петербург–Москва–Краснодар: Лань, 2010.
13. Rusakov O., Laskin M., Jaksumbaeva O. Pricing in the real estate market as a stochastic limit. Log Normal approximation // International Journal of the Mathematical models and methods in applied sciences. 2016. Vol. 10. P. 229–236.
14. Aitchinson J., Brown J.A.C. The Lognormal distribution with special references to its uses in economics. Cambridge: University Press, 1963.
15. Ohnishi T., Mizuno T., Shimizu C., Watanabe T. On the evolution of the house price distribution // Understanding Inflation Dynamics of the Japanese Economy. Working Paper Series. 2011. No. 56.
16. Ласкин М.Б. Корректировка рыночной стоимости по ценообразующему фактору «площадь объекта» // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2017. № 8(191). С. 86–99.
17. Методические указания о государственной кадастровой оценке. Приказ Росреестра от 04.08.2021 N П/0336. Зарегистрировано в Минюсте России 17.12.2021 № 66421. [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_403900/ (дата обращения 30.01.2025).
18. Кабаков Р. R в действии. Анализ и визуализация данных на языке R. М.: ДМК-Пресс, 2014.
19. Зарядов И.С. Введение в статистический пакет R: типы переменных, структуры данных, чтение и запись информации, графика. М.: Издательство РУДН, 2010.
20. Feller W. An introduction to probability theory and its applications, vol. 2. John Wiley & Sons; 2nd edition, 1971.
21. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. MVN: An R package for assessing multivariate normality // The R Journal. Vol. 6(2). P. 151–162. <https://doi.org/10.32614/RJ-2014-031>
22. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. MVN: An R package for assessing multivariate normality. Trakya University, Faculty of Medicine, Department of Biostatistics, Edirne, TURKEY, MVN version 5.8 (Last revision 2019-09-27). [Электронный ресурс]: <https://cran.r-project.org/web/packages/MVN/vignettes/MVN.pdf> (дата обращения 30.01.2025).
23. Современные тенденции рынка и оценка рыночной стоимости: коллективная монография. Ред. Н.Ю. Пузыня. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2020.
24. Баринов Н.П. Применение методов регрессионного анализа в задачах индивидуальной и массовой оценки объектов недвижимости // Вопросы оценки. 2022. № 1(106). С. 34–46.
25. Анисимова И.Н., Баринов Н.П., Грибовский С.В. Учет разнотипных ценообразующих факторов в многомерных моделях оценки недвижимости // Вопросы оценки. 2004. № 2. С. 2–15.
26. Баринов Н.П. Расчет интервала неопределенности оценки стоимости методами сравнительного подхода // Вопросы оценки. 2019. № 4(98). С. 2–10.

Об авторе

Ласкин Михаил Борисович

доктор экономических наук, кандидат физико-математических наук, доцент;

главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, д. 39;

профессор, кафедра информационных систем в экономике, СПбГУ, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9;

E-mail: laskinmb@yahoo.com

ORCID: 0000-0002-0143-4164

The method for the land plot value appraisal as part of the single real estate object, based on game theory approach

Michael B. Laskin

E-mail: laskin.m@iias.spb.su

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

In mass real estate valuation, in cadastral valuation, there is a problem of splitting the value of a single real estate object into the value of land plot and buildings (improvements) located on it. One of the key information sources for real estate valuation is market data. Such data may contain information on offer prices, as well as actual transaction prices (for example, in mortgage transactions) for the whole object. At the same time, in the accounting policy of enterprises different rates of land and property tax often require separate accounting of the value of land plots and the buildings located on them. The problem of such splitting of a single object's value is the subject of permanent discussions in the valuation community. There are no established methods. This article proposes a method of splitting the value of a single property object based on the approach borrowed from co-operative game theory. A simple game formulation of the problem and its fair solution based on the Shepley value are considered. Simple and well-interpretable computational formulas are obtained, which allow us to split the market value of single objects on large data sets in minimum time. The proposed method is new in the theory and practice of valuation.

Keywords: single real estate object, Shepley value, multiple linear regression, log-normal price distribution, property value splitting

Citation: Laskin M.B. (2025) The method for the land plot value appraisal as part of the single real estate object, based on game theory approach. *Business Informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 93–107. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.93.107

References

1. Kuznetsov D.D., Myagkov V.N. (2023) Land – separately, building – separately. How to solve the problem of unfolding the market value of the pledged object. *Bank Lending*, no. 6(112), pp. 60–76 (in Russian).
2. Bure V.M., Staroverova K.Yu. (2019) Applying cooperative games with coalition structure for data clustering. *Automation and Remote Control*, vol. 80, no. 8, pp. 1541–1551.
3. Rozemberczki B., Watson L., Bayer P., et al. (2022) The Shapley value in machine learning. *arXiv:2202.05594v2*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.05594>
4. Roth J., Bajorath J. (2024) Machine learning models with distinct Shapley value explanations decouple feature attribution and interpretation for chemical compound predictions. *Cell Reports Physical Science*, vol. 5, no. 8, pp. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102110>

5. Li M., Sun H., Huang Y., Chen H. (2024) Shapley value: from cooperative game to explainable artificial intelligence. *Autonomous Intelligent Systems*, vol. 4, article 2. <https://doi.org/10.1007/s43684-023-00060-8>
6. Feretzakis G., Sakagianni A., Anastasiou A., et al. (2024) Integrating Shapley values into machine learning techniques for enhanced predictions of hospital admissions. *Applied Sciences*, vol. 14(13), article 5925. <https://doi.org/10.3390/app14135925>
7. Kjersti A., Jullum M., Loland A. (2020) Explaining individual predictions when features are depended: More accurate approximations to Shapley values. *arXiv:1903.10464v3*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.10464>
8. Mikheenko A.M., Savich D.S. (2020) Application of Shepley value in regression analysis. *Vestnik of I. Kant Baltic Federal University. Ser.: Physic-mathematical and technical sciences*, no. 2, pp. 84–94 (in Russian).
9. Lundberg S.M., Allen P.G. (2017) A unified approach to interpreting model predictions. *ArXiv:1705.07874v2*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>
10. Özdilek Ü. (2020) Land and building separation based on Shapley values. *Palgrave Communications*, vol. 6, article 68. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-0444-1>
11. Petrosyan L.A., Zenkevich N.A., Semina E.A. (1998) *Game Theory*. Moscow: Higher School (in Russian).
12. Mazalov V.V. (2010) *Mathematical theory of games and applications*. St. Petersburg–Moscow–Krasnodar: Lan (in Russian).
13. Rusakov O., Laskin M., Jaksumbaeva O. (2016) Pricing in the real estate market as a stochastic limit. Log Normal approximation. *International Journal of the Mathematical models and methods in applied sciences*, vol. 10, pp. 229–236.
14. Aitchinson J., Brown J.A.C. (1963) *The Lognormal distribution with special references to its uses in economics*. Cambridge: University Press.
15. Ohnishi T., Mizuno T., Shimizu C., Watanabe T. (2011) On the evolution of the house price distribution. *Understanding Inflation Dynamics of the Japanese Economy*, Working Paper Series no. 56.
16. Laskin M.B. (2017) Adjustment of the market value by the pricing factor ‘area of the object’. *Property relations in the Russian Federation*, no. 8(191), pp. 86–99 (in Russian).
17. Rosreestr Order No. N/0336 dated 08/04/2021 (as amended on 09/11/2024) “On Approval of Methodological Guidelines on State Cadastral Valuation” (Registered with the Ministry of Justice of Russia on 12/17/2021 N 66421). Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_403900/ (accessed 30 January 2025) (in Russian).
18. Kabakov P. (2014) *R in action. Data analysis and visualization in the R language*. Moscow: DMK-Press (in Russian).
19. Zaryadov I.S. (2010) *Introduction to statistical package R: types of variables, data structures, reading and writing information, graphics*. Moscow: PUDN Publishing House (in Russian).
20. Feller W. (1971) *An introduction to probability theory and its applications, vol. 2*. John Wiley & Sons; 2nd edition.
21. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. (2014) MVN: An R package for assessing multivariate normality. *The R Journal*, vol. 6(2), pp. 151–162. <https://doi.org/10.32614/RJ-2014-031>
22. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. (2019) *MVN: An R package for assessing multivariate normality*. Trakya University, Faculty of Medicine, Department of Biostatistics, Edirne, TURKEY, MVN version 5.8 (Last revision 2019-09-27). Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/MVN/vignettes/MVN.pdf> (accessed 30 January 2025).
23. Puzynya N.Y. (2020) *Modern market trends and market value assessment: collective monograph*. St. Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta (in Russian).
24. Barinov N.P. (2022) Application of regression analysis methods in the tasks of individual and mass valuation of real estate objects. *Valuation Issues*, no. 1(106), pp. 34–46 (in Russian).
25. Anisimova I.N., Barinov N.P., Gribovsky S.V. (2004) Accounting for different types of price-forming factors in multidimensional models of real estate valuation. *Valuation Issues*, no. 2, pp. 2–15 (in Russian).
26. Barinov N.P. (2019) Calculation of the uncertainty interval of value estimation by methods of the comparative approach. *Valuation Issues*, no. 4(98), pp. 2–10 (in Russian).

About the author

Michael B. Laskin

Doctor of Sciences (Economics), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor;

Chief Scientist, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14th Line V.O., St. Petersburg 199178, Russia;
Professor, Department of Information Systems in Economics, St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Embankment, St. Petersburg 199034, Russia;

E-mail: laskinmb@yahoo.com

ORCID: 0000-0002-0143-4164