

ISSN 2713-1874

№4
2024

Научный журнал

ЭПЦ

Экономика
Право
ИННОВАЦИИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

EDITORIAL BOARD

Максимова Татьяна Геннадьевна, д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор, профессор факультета инфокоммуникационных технологий, факультета технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО – **главный редактор**

Антипов Антон Александрович, канд. филол. наук, доцент, доцент факультета технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО

Бессмертный Игорь Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор факультета программной инженерии и компьютерной техники; сотрудник Международного научного центра «Нелинейные и адаптивные системы управления», Университет ИТМО

Берестнева Ольга Григорьевна, д-р техн. наук, профессор, отделение информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Томский политехнический университет

Будрин Александр Германович, д-р экон. наук, профессор, профессор факультета технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО

Ватян Александра Сергеевна, канд. техн. наук, доцент факультета инфокоммуникационных технологий; сотрудник Международной лаборатории «Компьютерные технологии»; ст. науч. сотр. исследовательского центра в сфере искусственного интеллекта «Сильный искусственный интеллект в промышленности», Университет ИТМО

Верзилин Дмитрий Николаевич, д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; заведующий кафедрой менеджмента и экономики спорта, НГУ имени П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург

Горбашко Елена Анатольевна, д-р экон. наук, профессор, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный экономический университет

Горлушкина Наталия Николаевна, канд. техн. наук, доцент, доцент факультета инфокоммуникационных технологий, Университет ИТМО

Горовой Александр Андреевич, д-р экон. наук, доцент, профессор факультета технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО

Ена Олег Валерьевич, советник директора, руководитель проектного офиса, Федеральный институт промышленной собственности

Зайченко Кирилл Вадимович, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией радио- и оптоэлектронных приборов биоинформационных и геномных технологий ранней диагностики патологий живых систем, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук

Кравец Алла Григорьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования», руководитель проектной лаборатории «Киберфизические системы», Волгоградский государственный технический университет

Кузнецова Татьяна Викторовна, д-р пед. наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования, Федеральный институт промышленной собственности, заведующий Всероссийской патентно-технической библиотекой

Мурашова Светлана Витальевна, канд. экон. наук, доцент, начальник отдела управления интеллектуальной собственностью, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; доцент факультета технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО

Николаев Андрей Сергеевич, канд. экон. наук, доцент факультета технологического менеджмента и инноваций, директор центра развития института интеллектуальной собственности, Университет ИТМО

Павлов Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, профессор ВКА им. А.Ф. Можайского; ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Соколов Борис Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, руководитель лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Трофимов Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры информатики, Санкт-Петербургский государственный экономический университет

Туккель Иосиф Львович, д-р техн. наук, профессор, профессор высшей школы киберфизических систем и управления, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Харламова Татьяна Львовна, д-р экон. наук, профессор, профессор Высшей школы производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Хоружников Сергей Эдуардович, канд. физ.-мат. наук, доцент, директор национального центра квантового интернета, директор центра авторизованного обучения информационным технологиям; руководитель Международной лаборатории сетевых технологий в распределенных компьютерных системах, Университет ИТМО

Черешнев Валерий Александрович, академик РАН и РАМН, д-р мед. наук, профессор, научный руководитель Института иммунологии и физиологии УрО РАН, заведующий кафедрой иммунохимии, Уральский федеральный университет; президент Евразийского научно-исследовательского института человека, Уральский государственный экономический университет

Шаныгин Сергей Иванович, д-р экон. наук, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры статистики, учёта и аудита экономического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет

Шульгин Дмитрий Борисович, д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук, доцент, директор Центра интеллектуальной собственности, заведующий кафедрой инноватики и интеллектуальной собственности, Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина

Юрсева Лариса Владимировна, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры учета, анализа и аудита, Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина

Удалова Александра Леонидовна, инженер факультета инфокоммуникационных технологий Университета ИТМО – **ответственный секретарь редакции**

Tatiana G. Maximova, D.Sc, PhD, Professor, Faculty of Infocommunication Technologies, Faculty of Technology Management and Innovation, ITMO University – **Editor-in-chief**

Anton A. Antipov, PhD, Associate Professor, Faculty of Technology Management and Innovation, ITMO University

Igor A. Bessmertny, D.Sc, Professor, Faculty of Software Engineering and Computer Technology; Employee of the International Scientific Center «Nonlinear and Adaptive Control Systems», ITMO University

Olga G. Berestneva, D.Sc, Professor, Department of Information Technology, School of Information Technology and Robotics Engineering, Tomsk Polytechnic University

Aleksandr G. Budrin, D.Sc, Professor, Faculty of Technology Management and Innovation, ITMO University

Aleksandra S. Vatian, PhD, Associate Professor, Faculty of Infocommunication Technologies; Employee of the International laboratory «Computer technologies»; Senior Researcher in Research Center in the Field of Artificial Intelligence «Strong Artificial Intelligence in Industry», ITMO University

Dmitriy N. Verzilin, D.Sc, PhD, Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; Head of the Department of Management and Economics of Sports, Lesgaft NSU, St. Petersburg

Elena A. Gorbashko, D.Sc, Professor, Vice-Rector for Research, St. Petersburg State University of Economics

Natalia N. Gorlushkina, PhD, Associate Professor, Faculty of Infocommunication Technologies, ITMO University

Alexandr A. Gorovoi, D.Sc, Professor, Faculty of Technology Management and Innovation, ITMO University

Oleg V. Ena, Advisor to the Director, Head of the Project office, Federal Institute of Industrial Property

Kirill V. Zaichenko, D.Sc, Professor, Head of the Laboratory of Radio- and Optoelectronic Devices for Bioinformational and Genomic Technologies for Early Diagnosis of Pathologies of Living Systems, Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences

Alla G. Kravets, D.Sc, Professor, Professor of the Department of Computer-Aided Design and Search Design, Head of the Cyber-Physical Systems Design Laboratory, Volgograd State Technical University

Tatyana V. Kuznetsova, D.Sc, Professor, Honorary Worker of Higher Education, Federal Institute of Industrial Property, Head of the All-Russian Patent and Technical Library

Svetlana V. Murashova, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Intellectual Property Management, FSUE «Krylovsky State Scientific Center»; Associate Professor, Faculty of Technology Management and Innovation, ITMO University

Andrei S. Nikolaev, PhD, Associate Professor, Faculty of Technology Management and Innovation, Director of the Development Center of the Institute of Intellectual Property, ITMO University

Alexander N. Pavlov, D.Sc, Professor, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky; Leading Researcher of Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

Boris V. Sokolov, D.Sc, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

Valeriy V. Trofimov, D.Sc, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Saint Petersburg State University of Economics

Iosif L. Tukkel, D.Sc, Professor, Professor of the Higher School of Cyberphysical Systems and Control, Saint-Petersburg Peter the Great Polytechnic University

Tatiana L. Kharlamova, D.Sc, Professor, Graduate School of Industrial Management, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Sergey E. Khoruzhnikov, PhD, Associate Professor, Director of the National Center for Quantum Internet; Director of the Center for Authorized Information Technology Training; Head of the International Laboratory for Network Technologies in Distributed Computer Systems, ITMO University

Valeriy A. Chereshev, Academician of RAS and RAMS, D.Sc, Professor, Scientific Director of the Institute of Immunology and Physiology Ural branch of RAS, Head of Immunochemistry Department, Ural Federal University; President of the Eurasian Human Research Institute, Ural State University of Economics

Sergei I. Shanygin, D.Sc, PhD, Associate Professor, Professor, Department of Statistics, Accounting and Auditing of the Faculty of Economics, St. Petersburg State University

Dmitry B. Shulgin, D.Sc, PhD, Associate Professor, Head of the Intellectual Property Center, Head of Innovation and Intellectual Property Department, Ural Federal University of the First President of Russia B. N. Yeltsin

Larisa V. Iurieva, D.Sc, Professor, Accounting, Analysis and Audit Department, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

Aleksandra L. Udalova, Engineer, Faculty of Infocommunication Technologies, ITMO University – **executive secretary**

Журнал «Экономика. Право. Инновации» является периодическим научным печатным изданием.

Журнал публикует результаты научных исследований в области отраслевой и региональной экономики, управления в организационных системах.

Тематика статей связана с вопросами:

- выявления, анализа, прогнозирования и решения проблем экономики регионов, отраслей, предприятий;
- инновационного развития национальной экономики, коммерциализации инноваций и трансферта технологий;
- оценки роли интеллектуальной собственности в инновационной деятельности и в обеспечении качества продукции;
- выявления закономерностей влияния экономики на рынок труда и демографические процессы;
- обеспечения экономической безопасности, совершенствования институциональных и инфраструктурных аспектов развития и экологизации экономических систем;
- совершенствования экономической деятельности и повышения конкурентоспособности на основе применения современных маркетинговых технологий, информационно-коммуникационных технологий и технологий искусственного интеллекта;
- специфики применения современных информационных и коммуникационных технологий в различных областях экономической деятельности;
- экономического анализа финансово-хозяйственной деятельности, прикладных статистических исследований и статистической поддержки управленческих решений;
- оценивания и прогнозирования развития социально-экономических и организационных систем на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации;
- разработки теоретических основ, методов, алгоритмов и механизмов принятия решений в организационных системах;
- использования и разработки информационных технологий, методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений;
- информационного и программного обеспечения управления организационными системами.

Приветствуются междисциплинарные статьи, посвященные изучению организационных систем в качестве объектов управления; исследованиям закономерностей цифровой трансформации экономической деятельности; формированию механизмов устойчивого развития регионов, отраслей, комплексов, предприятий; анализу и осмыслению отраслевых и региональных особенностей инновационной деятельности и коммерциализации инноваций; разработке методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений; обоснованию практико-ориентированных технологий управления организационными системами и проектами.

Учредитель и издатель журнала –
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»

197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
Университет ИТМО
телефон: (812) 480-04-96 ecinn@itmo.ru
<https://ecinn.itmo.ru/>
eLibrary: https://elibrary.ru/title_about.asp?id=62275
Англоязычное название: «Economics. Law. Innovation»
Транслитерированное название:
«Ekonomika. Pravo. Innovacii»

Свидетельство о регистрации средства массовой
информации № ФС77-48173 выдано 19.01.2012
ISSN 2713-1874

Язык журнала – русский
Периодичность выхода издания – 4 номера в год

Плата за публикации и редактирование не взимается

Founder and publisher – ITMO University

49 Kronverksky pr., St. Petersburg, 197101, Russia
ITMO University
phone: (812) 480-04-96 ecinn@itmo.ru
<https://ecinn.itmo.ru/>
eLibrary: https://elibrary.ru/title_about.asp?id=62275
The English title is «Economics. Law. Innovation»
Transliterated title is «Ekonomika. Pravo. Innovacii»

Certificate of registration of mass media
№ ФС77-48173 dated 19.01.2012
ISSN 2713-1874

Language of the journal: Russian
Publication frequency is 4 times a year

Publication and editing are free of charge

Подписано в печать 29.12.2024 г. Формат 60x90 1/8. Гарнитура TimesNewRoman.

Отпечатано: Учреждение «Университетские телекоммуникации» Типография на Биржевой
199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, д. 16
Тел.: +7 (812) 915-14-54 e-mail: zakaz@TiBir.ru

**Региональная и отраслевая экономика /
Regional and branch economics**

- Голубева А. С., Павлова Е. А.* Взаимосвязь уровня социально-экономического развития и инновационно-инвестиционного потенциала региона 4
Golubeva A. S., Pavlova E. A. The Relationship Between the Level of Socio-Economic Development and the Innovative and Investment Capacity of the Region (In Russ.)
- Иванова Л. Н., Иванов С. Е.* Методы оптимизации и алгоритм маршрутизации в транспортной логистике 21
Ivanova L. N., Ivanov S. E. Optimization Methods and Routing Algorithm in Transport Logistics (In Russ.)
- Сысоенко М. В., Лебедева А. С.* Анализ применения технологий Индустрии 4.0 в интеллектуальных транспортных системах 30
Sysoenko M. M., Lebedeva A. S. Analysis of the Application of Industry 4.0 Technologies in Intelligent Transport Systems (In Russ.)

**Управление в организационных системах /
Management in organizational systems**

- Горшков П. В., Бессмертный И. А.* Сравнение методов управления IT-проектами 40
Gorshkov P. V., Bessmertny I. A. Comparison of IT Project Management Methods (In Russ.)
- Исаков А. О., Гусарова Н. Ф., Добренко Д. А., Голубев А. А.* Объяснимость поведения агентов в системах поддержки принятия клинических решений 50
Isakov A. O., Gusarova N. F., Dobrenko D. A., Golubev A. A. Explainability of Agent Behavior in Clinical Decision Support Systems (In Russ.)
- Ардатовский М. И., Максимова Т. Г.* Комбинированный метод планирования релизов в Agile-командах на основании генетических алгоритмов 60
Ardatovsky M. I., Maximova T. G. Combined Method of Release Planning in Agile Teams Based on Genetic Algorithms (In Russ.)
- Сведения об авторах* 69
Information about the authors

Научная статья
УДК 330; 332.1; 338.24
doi: 10.17586/2713-1874-2024-4-4-20

ВЗАИМОСВЯЗЬ УРОВНЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И ИННОВАЦИОННО-ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНА

Антонина Станиславовна Голубева^{1✉}, Елена Александровна Павлова²

^{1,2}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
¹astgolubeva@ya.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2785-6584>
²epavlova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6492-7102>
Язык статьи – русский

Аннотация: В условиях перехода Российской Федерации к инновационно-ориентированному экономическому росту повышается значимость инновационно-инвестиционного потенциала социально-экономических систем мезоуровня. Несогласованность деятельности экономических агентов в условиях трансформации экономической модели приводят к тому, что региональная политика сталкивается с рядом вызовов, обуславливающих снижение показателей эффективности стратегического развития. Предполагается, что определение приоритетов пространственно-отраслевой структуры при разработке Стратегий социально-экономического развития позволяет регионам эффективно адаптироваться под условия внешней среды и формировать конкурентоспособную инновационную инфраструктуру под воздействием благоприятного инвестиционного климата. Цель данной работы заключается в исследовании закономерности положения региона в рейтингах от наличия приоритетов пространственно-отраслевой структуры при реализации Стратегии социально-экономического развития и усиления инновационно-инвестиционного потенциала. В работе был проведен анализ регионального распределения по российским рейтингам с дальнейшим исследованием Стратегий социально-экономического развития и общей оценкой исследуемых факторов, позволивший выявить важность взаимообусловленности приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона со Стратегией социально-экономического развития и инновационно-инвестиционным потенциалом. Предложена авторская модель региональной инновационной системы, которая позволяет поэтапно определять подсистемы реализации региональной инвестиционной и инновационной политики, а также оценивать возможности их динамического взаимодействия, обеспечивающего непрерывную циркуляцию знаний, инвестиционных потоков и человеческого капитала. Инновационно-инвестиционный потенциал в результате координации элементов региональной инновационной системы представляет собой триаду взаимодействия системы создания, распространения и применения знаний. Коммуникативное взаимодействие между наукой, образованием и бизнесом приводит к формированию региональных инновационных кластеров, являющихся наивысшим проявлением уровня развития инновационно-инвестиционного потенциала социально-экономической системы (региона/субъекта Российской Федерации).

Ключевые слова: инвестиционный потенциал, инновационная экономика, инновационно-инвестиционный потенциал, инновационный потенциал, национальная инновационная система, пространственная экономика, региональная инновационная система, региональная экономика, социально-экономическое развитие

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623108 «Исследования и разработка проектных решений в условиях устойчивого развития и ESG-трансформации социально-экономических систем» Университета ИТМО.

Ссылка для цитирования: Голубева А. С., Павлова Е. А. Взаимосвязь уровня социально-экономического развития и инновационно-инвестиционного потенциала региона // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 4. С. 4–20. <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-4-20>.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE LEVEL OF SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT AND THE INNOVATIVE AND INVESTMENT CAPACITY OF THE REGION

Antonina S. Golubeva^{1✉}, Elena A. Pavlova²

^{1,2}ITMO University, Saint Petersburg, Russia
¹astgolubeva@ya.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2785-6584>
²epavlova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6492-7102>
Article in Russian

Abstract: In the context of the transition of the Russian Federation to innovation-oriented economic growth, the importance of the innovation and investment potential of meso-level socio-economic systems is increasing. The inconsistency of the activities of economic agents in the context of the transformation of the economic model leads to the fact that regional policy faces a number of challenges that cause a decrease in the effectiveness of strategic development. It is assumed that determining the priorities of the spatial and sectoral structure in the development of socio-economic development Strategies allows regions to effectively adapt to environmental conditions and form a competitive innovation infrastructure under the influence of a favorable investment climate. The purpose of this work is to study the regularity of the region's position in the ratings from the presence of priorities of the spatial and sectoral structure in the implementation of the Strategy of socio-economic development and strengthening of innovation and investment potential. The paper analyzed the regional distribution according to Russian ratings with further research of socio-economic development Strategies and a general assessment of the factors studied, which made it possible to identify the importance of the interdependence of priority areas of the spatial and sectoral structure of the region with the Strategy of socio-economic development and innovation and investment potential. The author's model of the regional innovation system is proposed, which allows to gradually determine the subsystems of the implementation of regional investment and innovation policy, as well as to assess the possibilities of their dynamic interaction, ensuring the continuous circulation of knowledge, investment flows and human capital. The innovation and investment potential as a result of the coordination of the elements of the regional innovation system represents a triad of interaction between the system of creation, dissemination and application of knowledge. The communicative interaction between science, education and business leads to the formation of regional innovation clusters, which are the highest manifestation of the level of development of the innovation and investment potential of the socio-economic system (region/subject of the Russian Federation).

Keywords: innovation and investment capacity, innovation economics, national innovation system, regional economics, regional innovation system, socioeconomic development, spatial economics

The work was carried out within the framework of the research topic No. 623108 «Research and development of design solutions in the context of sustainable development and ESG transformation of socio-economic systems» of ITMO University.

For citation: Golubeva A. S., Pavlova E. A. The Relationship Between the Level of Socio-Economic Development and the Innovative and Investment Capacity of the Region. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 4. pp. 4–20. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-4-20>.

Введение. Переход к инновационно-ориентированной экономике сопровождается локальными стратегическими изменениями в региональной политике и выявлением приоритетных направлений деятельности в пространственно-отраслевой структуре социально-экономических систем (субъектов Российской Федерации) с целью определения векторов интеграционного взаимодействия науки, образования и бизнеса как элементов национальной инновационной системы (далее – НИС) в исследовании, разработке и распространении высокотехнологичной конкурентоспособной продукции, обеспечивающей устойчивость макроэкономических процессов при возникновении политических и экономических шоков.

В то же время на современном этапе переход экономики с экспортно-сырьевой модели в постиндустриальное общество с инновационно-ориентированным вектором развития затрудняется в связи с неэффективной региональной политикой, во многом не учитывающей приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры в синергии со Стратегией социально-экономического развития (далее – ССЭР) региона, а

также наличием определенного уровня инновационно-инвестиционного потенциала. Оторванность региональной инновационной политики и разрабатываемых стратегий от общего вектора социально-экономического развития снижает положительный эффект от внедряемых стратегий и замедляет формирование комплексной инновационной инфраструктуры и благоприятного инвестиционного климата.

Значительная межрегиональная дифференциация субъектов Российской Федерации определяет необходимость разработки индивидуальных Стратегий социально-экономического развития регионов и государственных программ с учетом пространственно-отраслевой структуры и приоритетов экономической деятельности на мезоуровне, когда регион рассматривается как самостоятельная социально-экономическая система [1, С. 148]. Однако трансформация стратегий инновационного развития регионов сопровождается рядом ключевых проблем: низкой конкурентоспособностью производимой продукции; слабой эффективностью концепций инновационного развития преимущественно в регионах, ориентированных на совершенств-

зование реального сектора экономики; дифференциацией регионов по объему инвестиций и уровню инновационной деятельности; отсутствием инновационной инфраструктуры, необходимой для активизации инновационных процессов [2, С. 91]. В международной практике формирование национальной инновационной системы возникает за счет инновационно-ориентированного подхода к социально-экономическому развитию, вследствие чего повышается инновационно-инвестиционный потенциал в ключевых направлениях пространственно-отраслевой структуры как фундаментальной основы региональной экономики [3, С. 730].

Таким образом, в национальной инновационной системе регионы обладают структурообразующим значением в силу того, что относятся к социально-экономическим системам мезоуровня, то есть могут одновременно являться, как управляемым, так и управляющим элементом, занимая промежуточное положение между микро- и макросистемами вследствие внедрения эффективной локальной инновационной политики, тем самым стимулируя экономические процессы и формируя региональную инновационную систему (далее – РИС) [1, С. 148]. При переходе с экспортно-сырьевой модели развития экономики Российской Федерации к постиндустриальному обществу повышается значимость критической цели региональной экономики, связанной с повышением устойчивости и конкурентоспособности [2, С. 118]. В силу недостатка эффективных решений, способствующих устранению сложившейся несогласованности в деятельности экономических агентов, не позволяющей активизировать инновационную деятельность, а также развить инновационно-инвестиционный потенциал, инновационно-ориентированная модель экономики направлена на формирование институциональных условий, в том числе региональной, а впоследствии и национальной инновационной системы [4, С. 164]. Данная научно-исследовательская работа сосредоточена на анализе текущей региональной политики в субъектах Северо-Западного федерального округа с целью оценки уровня обеспеченности инновационной инфраструктурой и благоприятным инвестиционным климатом, усиливающих инновационно-

инвестиционный потенциал и ускоряющих формирование региональной инновационной системы, встраиваемой в национальную инновационную систему.

Гипотеза и цель исследования. Гипотеза исследования базируется на предположении о важности взаимообусловленности приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона при разработке эффективных Стратегий социально-экономического развития, достижения заявленных целей и усиления инновационно-инвестиционного потенциала.

Цель исследования заключается в выявлении закономерности положения региона в рейтингах от наличия приоритетов пространственно-отраслевой структуры при реализации Стратегии социально-экономического развития и усиления инновационно-инвестиционного потенциала.

Задачи исследования сводятся к исследованию субъектов Северо-Западного федерального округа в рейтингах социально-экономического развития, анализу Стратегий социально-экономического развития с точки зрения учета приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры, определяющих вектор совершенствования региональной инновационной политики, а также ведущих к формированию инновационной инфраструктуры и благоприятного инвестиционного климата, активизирующих усиление инновационно-инвестиционного потенциала. По итогам анализа показателей распределения в избранных рейтингах, а также Стратегий социально-экономического развития субъектов Северо-Западного федерального округа необходимо оценить уровень взаимообусловленности СЭР, приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры и инновационно-инвестиционного потенциала. На основе полученных выводов предполагается рассмотреть модели региональных инновационных систем и предложить авторскую интерпретацию, учитывающую взаимодействие между подсистемами и ключевыми элементами принятия стратегических решений, обладающую динамичностью и адаптивностью под изменения внешней среды и определяющую повышение конкурентоспособности субъекта Российской Федерации в условиях перехода к

инновационно-ориентированной модели развития экономики.

Литературный обзор. При разработке и реализации отраслевых документов стратегического планирования органы государственной власти субъектов Российской Федерации и органы местного самоуправления обязаны руководствоваться основополагающими стратегическими документами. Так, нормативно-правовые документы, регламентирующие трансформацию экспортно-сырьевой модели экономики Российской Федерации, включают в себя Концепцию технологического развития на период до 2030 года (далее – Концепция), утвержденную распоряжением Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-р, где указано, что инновационно-ориентированный экономический рост – это тип социально-экономического развития [5, С. 4]. В связи с данным фактом подчеркивается важность реализации целей и задач Концепции в части формирования национальной инновационной системы, направленной на обеспечение условий инновационно-ориентированного развития страны в соответствии с национальными целями и интересами. Связь между национальной инновационной системой и региональной инновационной системой можно представить следующим образом – государство на уровне НИС за счет бюджета формирует приоритетные направления инновационного развития с помощью стимулирования программ поддержки и определения национальных проектов, а региональная политика, встроенная в структуру РИС, адаптирует приоритеты под пространственно-отраслевую структуру субъекта Российской Федерации [6].

В работе О. В. Васюхина и Е. А. Павловой [7] инновационный потенциал рассматривается как одно из системных свойств социально-экономической системы, что указывает на двустороннюю причинно-следственную связь: эффективная стратегия социально-экономического развития стимулирует исследование, разработку и диффузию инноваций, а приверженность принципам инновационной экономики усиливает результативность социально-экономических показателей региона.

Про наличие специфического потенциала внутри социально-экономической подсистемы национального хозяйства и

необходимости выработки и реализации эффективной долгосрочной стратегии социально-экономического развития, направленной на «инновационный прорыв», говорится в работе Р. Г. Маннапова и Л. Г. Ахтариевой [8, С. 131].

В то же время оторванность от направлений социально-экономического развития субъектов Российской Федерации является причиной малоэффективной инновационной политики, так как регион, как основной субъект социально-экономических отношений в контексте федеративного государства в условиях трансформации экономики в инновационно-ориентированную модель развития, обладает приоритетными направлениями пространственно-отраслевой структуры и дифференциацией в специфических природно-ресурсных, климатических, культурно-исторических, демографических пространственных и иных характеристиках [9, С. 1303; 10, С. 110].

О важности региональной дифференциации также говорится в работе Philip Cooke, Mikel Gomez Uranga, Goio Etxebarria, где авторы определяют регионы как территории, меньшие чем государство и развивающиеся по индивидуальной траектории в зависимости от политических, культурных и экономических сил [11, С. 480].

Таким образом, в условиях национальной инновационной системы элементы макро- и мезоуровня обеспечивают функционирование предпринимательской и исследовательской среды, а инновационно-инвестиционный потенциал является одним из факторов, влияющих на эффективное развитие социально-экономических систем мезоуровня с учетом дифференцированного подхода [1, С. 151]. Исследования связи между инфраструктурой, обеспечивающей проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (англ. «structure of R&D system») в отдельных европейских регионах, уровнем социально-экономического развития и инновационным потенциалом отражены в работе J. Blažek и V. Kadlec [12].

В результате инновационно-инвестиционный потенциал может рассматриваться, как стратегический механизм стимулирования роста показателей социально-экономического развития субъектов Российской Феде-

рации в условиях экономической деятельности на мезоуровне, так как долгосрочное стратегическое планирование предусматривает прогнозирование научно-технологического развития во взаимосвязи с социально-экономическим [1; 4, С. 160; 5, С. 51; 9, С. 1303]. В связи с вышесказанным можно сделать вывод, что устойчивое социально-экономическое развитие обязательно включает в себя направления совершенствования инновационно-инвестиционного потенциала, в то же время инновационно-инвестиционный потенциал формируется за счет приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры социально-экономической системы — субъекта Российской Федерации [4, С. 166].

Методы и материалы исследования.

Для подтверждения или опровержения авторской гипотезы использовались общелогические методы теоретического уровня – анализ, синтез, обобщение и дедукция – и методы эмпирического уровня для проработки Стратегий социально-развития регионов и их положения в избранных рейтингах.

Теоретическую базу научно-исследовательской работы составили нормативно-правовые документы Российской Федерации, связанные с пространственным развитием территорий и переходом к инновационно-ориентированному экономическому развитию, а также работы российских и зарубежных авторов, исследующих инновационно-инвестиционный потенциал, национальную и региональную инновационные системы, дифференциацию Стратегий социально-экономического развития.

Также были изучены нормативно-правовые документы с помощью контент-анализа, в частности особое внимание было уделено «Концепции технологического развития на период 2030 года» [5]. Исследование основано на полученных показателях регионов в рейтингах, рекомендуемых для использования при стратегическом планировании Ресурсным центром по стратегическому планированию (РЦСП) при Леонтьевском центре: Рейтинг социально-экономического положения регионов по итогам 2021 года; Рейтинг субъектов Российской Федерации по значению индекса «Социально-экономические условия инновационной деятельности», 2021

г.; Индекс конкурентоспособности регионов России 2021. AV RCI–2021 alfa [13]. Для изучения уровня достижения показателей социально-экономического развития регионы были проанализированы по избранным российским рейтингам, показатели которых после применения методов нормализации, таких как минимально-максимальная нормализация и десятичное масштабирование, приводились к общему среднему значению с целью сопоставимости данных, что позволило провести комплексную оценку показателей уровня социально-экономического развития. Важная часть исследования была посвящена рассмотрению Стратегий социально-экономического развития одиннадцати субъектов Северо-Западного федерального округа с последующей оценкой Стратегий по пятибалльной шкале в зависимости от наличия приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры, условий для наращивания инновационного и инвестиционного потенциала.

В результате средние значения положения регионов в избранных рейтингах сравнивались с полученными оценками Стратегий социально-экономического развития для подтверждения или опровержения авторской гипотезы, связанной с важностью взаимообусловленности приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона при разработке эффективных Стратегий социально-экономического развития и усиления инновационно-инвестиционного потенциала.

Полученные результаты. В процессе проведения исследования были проанализированы сущностные определения таких терминов как: пространственно-отраслевая структура региона, инновационно-инвестиционный потенциал региона, региональная инновационная система; выявлены приоритетные направления развития региональных социально-экономических систем [14, С. 45; 15, С. 1103]. Авторская дефиниция основного определения выглядит следующим образом: *инновационно-инвестиционный потенциал региона является неделимой комплексной характеристикой, отображающей возможности приоритетного развития социально-экономической системы путем стимулирования инновационной деятельности с*

помощью инвестиций в приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры.

Активизация привлечения инвестиций в регион возможна за счет:

- 1) Повышения инвестиционной привлекательности региона при усилении инновационно-инвестиционного потенциала.
- 2) Реформирования системы управления инновационно-инвестиционной деятельностью.
- 3) Институционального обеспечения активизации инновационно-инвестиционной деятельности.
- 4) Развития предпринимательства.
- 5) Улучшения бизнес-климата.
- 6) Внедрения проектно-ориентированного подхода к привлечению инвестиций [2].

Общая инновационная инфраструктура, согласно М. Е. Porter и S. Stern – это комплекс, сочетающий в себе междисциплинарные инвестиции и политические решения, поддерживающие инновационную деятельность в экономической системе в приоритетных направлениях достижения национальных целей и интересов [16, С. 5]. Так, инновационная и инвестиционная стратегия в работе Р. Г. Маннапова и Л. Г. Ахтариевой включена в долгосрочную стратегию социально-экономического развития региона [8, С. 113].

Большинство авторов определяют инновационную и инвестиционную стратегию как составляющие Стратегии социально-экономического развития, во многом формирующие цели и задачи СЭР и соответствующие результаты реализации. Следует отметить,

что инновационная и инвестиционная стратегии в значительной степени основаны на уровне инновационно-инвестиционного потенциала региона, что определяет необходимость проведения исследований взаимосвязи и взаимозависимости этих понятий с целью выявления и минимизации факторов дифференциации, и разработки более комплексного подхода к оценке эффективности стратегического планирования на региональном уровне через сопоставление заявленных в стратегиях целей и фактических позиций регионов в ключевых рейтингах.

Для того, чтобы исследовать взаимосвязь между уровнем социально-экономического развития и инновационно-инвестиционным потенциалом, формирующимся за счет определения приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры социально-экономической системы, необходимо выбрать наиболее релевантные российские рейтинги регионов Российской Федерации. В таблице 1 представлен сводный список отобранных рейтингов, оптимальных для дальнейшего анализа ССЭР на основе анализа их содержательных характеристик.

Выбор обусловлен тем, что полученные регионами РФ показатели в указанных рейтингах наиболее полно соотносятся с целью данного исследования, связанной с подтверждением взаимообусловленности приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона при разработке эффективных Стратегий социально-экономического развития и усиления инновационно-инвестиционного потенциала.

Таблица 1

Характеристика рейтингов для оценки уровня социально-экономического развития

Источник: составлено авторами на основе [17–19]

Наименование рейтинга	Наименование агентства	Характеристика
Рейтинг социально-экономического положения регионов по итогам 2021 года (РСЭР)	РИА Рейтинг	Агрегирование показателей по четырем группам (показатели масштаба и эффективности экономики, бюджетной и социальной сферы), характеризующим уровень социально-экономического развития, наиболее полно отражает текущее состояние в регионе.
Рейтинг субъектов Российской Федерации по значению индекса	Институт статистических исследований и экономики знаний	Индекс представляет собой агрегированную оценку экономического, образовательного и цифрового развития, что отражает потенциал к совершенствованию

Наименование рейтинга	Наименование агентства	Характеристика
«Социально-экономические условия инновационной деятельности», 2021 г. (ИСЭУ)	Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»	инновационной инфраструктуры, активизирующей инновационную деятельность, в текущих социально-экономических условиях.
Индекс конкурентоспособности регионов России 2021. AV RCI-2021 alfa (ИКРР)	Консорциум Леонтьевский центр — AV Group	Индекс важен с точки зрения обеспечения конкурентоспособности региона в социально-экономическом развитии и характеризует фактическую способность конкурировать за ресурсы и рынки сбыта, что важно при формировании инновационной инфраструктуры и обеспечении благоприятного инвестиционного климата.

В результате исследования положения субъектов Северо-Западного федерального округа в избранных рейтингах за 2021 год была составлена таблица 2. Для объективности сравнения рейтинговых значений с целью нормализации показатели РСЭР делились на 100. Для показателей ИСЭУ применялся минимально-максимальный метод нормализации (англ. «Min-Max Method»). Метод предполагает преобразование показателей, имеющих разную размерность, в набор показателей, выстроенных по заданной шкале [20, С. 7]. В данном исследовании в качестве эталонного значения были приняты показатели ИСЭУ города Москвы. Нормализованные значения определены по формуле:

$$X_{norm} = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (1)$$

где X_{norm} – нормализованное значение; X_i – исходное значение; X_{min} – минимальное значение набора данных; X_{max} – максимальное значение набора данных.

Этот метод позволяет изменять масштаб выходных значений в любом диапазоне на новый диапазон. Значения масштабируются между [0; 1], следовательно, показатель ИСЭУ города Москвы (0,663) приравнялся к единице диапазона, оставшиеся значения были рассчитаны относительно максимального значения 0,663 [21, С. 175].

По итогу полученных средних значений были распределены оценки от 0 до 5 баллов следующим образом: среднее значение города Санкт-Петербурга было приравнено к выбросу, город автоматически получил 5 баллов. Для оставшихся значений шаг вхождения в диапазон был рассчитан, как $(0,492 - 0,219) / 5 \approx 0,055$. Следовательно, 0 баллов получили субъекты с диапазоном средних значений по рейтингам от 0,219 до 0,274; 1 балл – (0,274; 0,328]; 2 балла – (0,328; 0,383]; 3 балла – (0,383; 0,437]; 4 балла – (0,437; 0,492].

Таблица 2

Распределение субъектов Северо-Западного федерального округа по избранным рейтинговым оценкам

Источник: составлено авторами на основе [17–19]

Субъект Российской Федерации	РСЭР	ИСЭУ	ИКРР	Среднее значение по рейтингам	Оценка положения в рейтингах
Санкт-Петербург	0,861	0,856	0,800	0,839	5
Ленинградская область	0,642	0,339	0,494	0,492	4
Калининградская область	0,449	0,489	0,416	0,451	4
Мурманская область	0,488	0,467	0,364	0,440	4

Субъект Российской Федерации	РСЭР	ИСЭУ	ИКРР	Среднее значение по рейтингам	Оценка положения в рейтингах
Вологодская область	0,539	0,335	0,368	0,414	3
Архангельская область	0,402	0,382	0,304	0,363	2
Республика Коми	0,406	0,273	0,310	0,330	2
Республика Карелия	0,325	0,207	0,272	0,268	0
Новгородская область	0,340	0,228	0,196	0,255	0
Псковская область	0,272	0,292	0,148	0,237	0
Ненецкий автономный округ	0,341	0,160	0,156	0,219	0

Примечание: РСЭР – Рейтинг социально-экономического положения регионов; ИСЭУ – Индекс «Социально-экономические условия инновационной деятельности»; ИКРР – Индекс конкурентоспособности регионов России.

Согласно рейтинговому распределению регионов в составе Северо-Западного федерального округа, ожидаемо выбиваются показатели города Санкт-Петербурга как абсолютного флагмана среди субъектов СЗФО. С одной стороны, указанная тенденция создает условия для обеспечения конкурентной среды, когда «догоняющие» регионы-аутсайдеры ориентируются на позитивный опыт модернизации экономической модели лидирующего субъекта; с другой – направление инвестиций в один регион обеспечивает создание инновационной инфраструктуры только в границах одного субъекта, что негативно сказывается на эффективности мероприятий, проводимых в контексте достижения целей и задач, выделенных в Стратегиях социально-экономического развития.

Дальнейшее исследование роли разработки и внедрения комплексных Стратегий социально-экономического развития в достижении высоких рейтинговых показателей субъекта Российской Федерации целесообразно осуществить, опираясь на анализ следующих элементов.

1) Наличие приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры в ССЭР. Предполагается, что нацеленность на приоритетные направления в Стратегии позволяет более эффективно проводить трансформацию экономической модели в инновационно-ориентированную, не упуская субъектные характеристики, являющиеся основой экономического развития региона.

2) Отражение инновационного потенциала в Стратегии. Согласно литературному обзору, инновационный потенциал обязательно является элементом устойчивого социально-экономического развития, следовательно, позволяет региону занимать более высокое положение в рейтинговых оценках.

3) Отражение инвестиционного потенциала в Стратегии. Взаимобусловленность инновационного и инвестиционного потенциала предполагает наличие благоприятного инвестиционного климата для привлечения финансирования и развития инновационной инфраструктуры.

Согласно авторской категоризации федеральных округов с помощью интерпретации понятия «территория» в контексте философских категорий в качестве «отношения» (англ. «Relation») к федеративному государственному устройству, а также проведенному исследованию Стратегий социально-экономического развития субъектов Российской Федерации, Северо-Западный федеральный округ (далее – СЗФО) обладает потенциалом в создании эффективной транспортно-логистической инфраструктуры и в обеспечении внешнеэкономических связей, что должно отражаться в приоритетных направлениях пространственно-отраслевой структуры субъектов СЗФО [19, С. 110]. Отдельно про роль транспортно-логистической инфраструктуры и экспортной активности во внешнеэкономических связях для эффективного осуществления экономической деятельности субъектов

Северо-Западного федерального округа также говорится в авторских научно-исследовательских работах и публикациях А. И. Балашова, Е. М. Роговой и И. А. Рудской, Е. В. Лукина и А. Ю. Кудревич, П. Л. Глухих, Т. С. Соболев, И. Е. Рисина [22, С. 27; 6, С. 109; 23; 24, С. 52; 25, С. 200; 26; С. 44].

Первичный анализ Стратегий социально-экономического развития субъектов Северо-Западного федерального округа показал, что девять из одиннадцати регионов в качестве приоритетного направления пространственно-отраслевой структуры так или иначе выделяют транспортно-логистическую инфраструктуру и внешнеэкономические связи. Интересно, что Республика Карелия и Псковская область, относящиеся к субъектам, не определяющим указанные приоритеты в качестве ключевых задач, в Стратегии подчеркивают важность формирования и развития инновационной инфраструктуры, благоприятного инвестиционного климата и институциональной среды, а также пересмотра инновационной политики. По среднему значению показателей в избранных рейтингах Республика Карелия находится на восьмом месте, а Псковская область – на десятом. С другой стороны, в Стратегии Ненецкого автономного округа, располагающегося на одиннадцатом месте, учтено влияние приоритетного направления пространственно-отраслевой структуры, связанного с развитием транспортно-логистической инфраструктуры.

Однако транспортная изолированность и недостаток инфраструктуры закономерно снижает общий уровень социально-экономического развития. Стратегия социально-экономического развития Новгородской области отражает перспективные направления модернизации и совершенствования инновационной инфраструктуры, а также обеспечения благоприятного инвестиционного климата, но субъект СЗФО находится на девятом месте по среднему значению показателей в избранных рейтингах. Далее в научно-исследовательской работе Стратегия Новгородской области будет рассмотрена более подробно.

Несмотря на наличие спорных выводов, касающихся Новгородской области, можно предположить, что определение приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры в Стратегии социально-экономического развития региона является фактором стимулирования инновационной активности и привлечения инвестиций, а также усиления инновационно-инвестиционного потенциала. На основе показателей распределения в избранных рейтингах, а также анализа Стратегий социально-экономического развития субъектов Северо-Западного федерального округа была проведена оценка взаимообусловленности СЭР, приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры и инновационно-инвестиционного потенциала, представленная в таблице 3.

Таблица 3

**Частные и итоговые оценки взаимообусловленности
Стратегии социально-экономического развития, приоритетных направлений
пространственно-отраслевой структуры региона
и инновационно-инвестиционного потенциала**

Источник: составлено авторами на основе Стратегий социально-экономического развития субъектов Северо-Западного федерального округа и [17–19; 26]

Субъект Северо-Западного федерального округа	Оценки, полученные в результате анализа ССЭР				Среднее значение оценок
	А	Б	В	Г	
Санкт-Петербург	5	5	5	5	5
Калининградская область	5	3	5	4	4,25
Ленинградская область	4	3	5	4	4
Вологодская область	5	3	3	3	3,5
Архангельская область	5	2	3	2	3
Новгородская область	4	3	4	0	2,75

Субъект Северо-Западного федерального округа	Оценки, полученные в результате анализа ССЭР				Среднее значение оценок
	А	Б	В	Г	
Республика Коми	3	1	4	2	2,5
Мурманская область	3	1	1	4	2,25
Псковская область	2	1	3	0	1,5
Ненецкий автономный округ	4	0	1	0	1,25
Республика Карелия	2	2	0	0	1

При проведении оценки использовались следующие оценочные характеристики.

Оценка «5» – полностью отражено.

А) Приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры региона выявлены, цели и задачи социально-экономической политики сосредоточены на реализации приоритетных направлений.

Б) Созданы условия для наращивания инновационного потенциала.

В) Созданы условия для наращивания инвестиционного потенциала.

Г) Среднее значение показателя по избранным рейтингам региона находится в диапазоне выше 0,492 (см. таблицу 2).

Оценка «4» – частично отражено.

А) Приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры упоминаются и частично учитываются в стратегии, цели и задачи социально-экономической политики полностью не отражают потенциал развития субъекта Российской Федерации. Либо имеются проблемные факторы реализации приоритетных направлений, разъясняющиеся в Стратегии.

Б) Созданы условия для наращивания инновационного потенциала, однако имеются проблемные показатели в области формирования инновационной инфраструктуры.

В) Созданы условия для наращивания инвестиционного потенциала, однако имеются проблемные показатели в области формирования благоприятного инвестиционного климата.

Г) Среднее значение показателя по избранным рейтингам региона находится в диапазоне от 0,437 до 0,492 включительно (см. таблицу 2).

Оценка «3» — отражено, но не обладает приоритетом.

А) Приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры упоминаются, но не учитываются в стратегии, цели и задачи социально-экономической политики частично отражают потенциал развития субъекта Российской Федерации. Либо имеются проблемные факторы реализации приоритетных направлений, которые слабо акцентированы.

Б) Частично созданы условия для наращивания инновационного потенциала.

В) Частично созданы условия для наращивания инвестиционного потенциала.

Г) Среднее значение показателя по избранным рейтингам региона находится в диапазоне от 0,383 до 0,437 включительно (см. таблицу 2).

Оценка «2» – практически не отражено.

А) Приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры упоминаются, но акцент смещается на определение иных приоритетов, цели и задачи социально-экономической политики не отражают потенциал развития субъекта Российской Федерации.

Б) Условия для наращивания инновационного потенциала – инновационная инфраструктура – созданы и находятся на переходном этапе повышения инновационного потенциала.

В) Условия для наращивания инновационного потенциала – благоприятный инвестиционный климат – созданы и находятся на переходном этапе повышения инвестиционного потенциала.

Г) Среднее значение показателя по избранным рейтингам региона находится в диа-

пазоне от 0,328 до 0,383 включительно (см. таблицу 2).

Оценка «1» — упоминается, но в Стратегии социально-экономического развития акцент смещен на иные направления.

А) Приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры выявлены, но не являются релевантными для ССЭР по ряду указанных в Стратегии причин.

Б) Только началось формирование инновационной инфраструктуры.

В) Только началось формирование условий для обеспечения благоприятного инвестиционного климата.

Г) Среднее значение показателя по избранным рейтингам региона находится в диапазоне от 0,274 до 0,328 включительно (см. таблицу 2).

Оценка «0» — совсем не отражено.

А) Приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры не выявлены.

Б) Инновационная инфраструктура и инновационный потенциал отсутствуют.

В) Благоприятный инвестиционный климат и инвестиционный потенциал отсутствуют.

Г) Среднее значение показателя по избранным рейтингам региона находится в диапазоне от 0,219 до 0,274 включительно (см. таблицу 2).

Для более комплексного анализа на рисунке 1 представлен график рассмотренных показателей распределения субъектов Российской Федерации по избранным рейтингам.

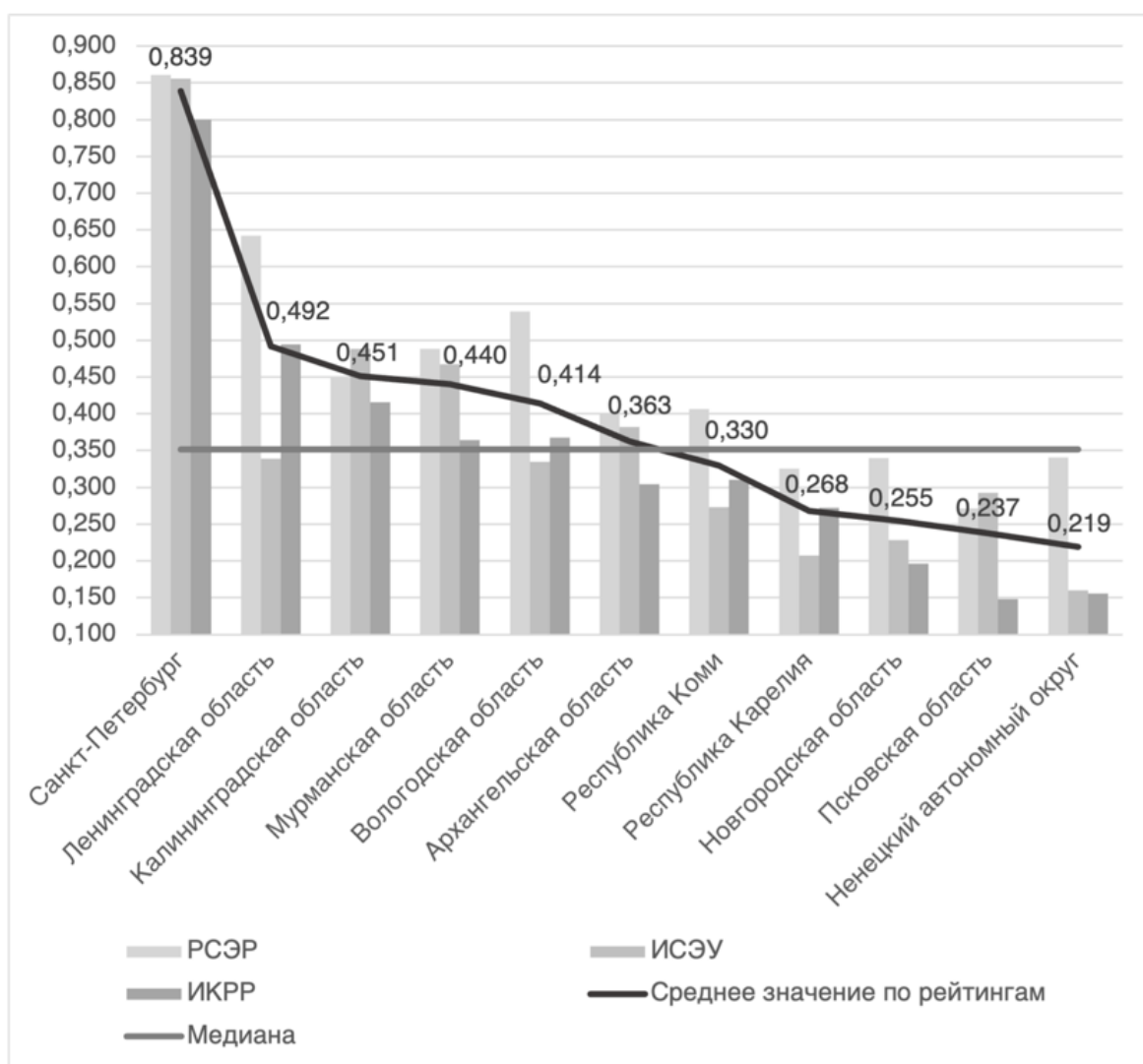


Рисунок 1 – Распределение субъектов Северо-Западного федерального округа по рейтинговым оценкам

Источник: составлено авторами на основе [17–19]

Примечание: значение медианы равно 0,352

При детальном анализе данных таблицы 3 и рисунка 1, а также Стратегий социально-экономического развития субъектов СЗФО можно заключить, что половина субъектов (Санкт-Петербург, Ленинградская область, Калининградская область, Мурманская область, Вологодская область) находится выше медианного значения, а вторая – ниже (Республика Коми, Республика Карелия, Новгородская область, Псковская область). Архангельская область представляет собой переходный регион между субъектами со средней и выше взаимообусловленностью ССЭР, приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры и инновационно-инвестиционного потенциала, так как среднее значение по рейтингам – 0,363 – находится вблизи медианного значения – 0,352.

Выбивается Мурманская область, так как по среднему значению показателей в избранных рейтингах находится на четвертом месте со средним значением оценок 2,25. Предположительно, высокие показатели в рейтингах связаны с ориентиром на промышленное производство, обеспечивающее достаточный уровень среднедушевого ВРП.

Остальные субъекты Северо-Западного федерального округа соответствуют количеству набранных баллов в таблице 3 и значениям показателей, набранных в избранных рейтингах, если оценка за показатель Б «Отражение инновационного потенциала в Стратегии» равнялась 2 и ниже, то в индексе «Социально-экономические условия инновационной деятельности» субъект располагался

на крайних низких позициях (Республика Коми: 1 балл оценка Б, 8 место ИСЭУ; Псковская область: 1 балл оценка Б, 7 место ИСЭУ; Ненецкий автономный округ: 0 баллов оценка Б, 11 место ИСЭУ; Республика Карелия: 2 балла оценка Б, 10 место ИСЭУ).

Индекс «Социально-экономические условия инновационной деятельности» отражает авторскую гипотезу, связанную с предположением о взаимообусловленности приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона, уровня социально-экономического развития и инновационно-инвестиционного потенциала, так как демонстрирует потенциал к совершенствованию инновационной структуры, активизирующей инновационную деятельность, в текущих социально-экономических условиях. В результате проведенного исследования можно заключить, что формирование инновационно-инвестиционного потенциала субъекта Российской Федерации обязательно должно начинаться с разработки эффективной Стратегии социально-экономического развития, определяющей приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры региона.

На рисунке 2 представлена общая схема модели региональной инновационной системы, встроенной в национальную инновационную систему, в связи с важностью внутрисистемных отношений и выявлением ключевых ролей отдельных элементов в эффективном функционировании социально-экономической системы.



Рисунок 2 – Модель региональной инновационной системы

Источник: составлено авторами

Внутрисистемные отношения РИС позволяют элементам своевременно адаптироваться под условия изменяющейся среды, трансформировать и совершенствовать существующие стратегии как пространственного, так и инновационно-ориентированного развития для повышения конкурентоспособности субъектов РФ [27, С. 98]. Встраиваемость в НИС способствует учету национальных целей и интересов Российской Федерации при разработке механизмов реализации региональной политики, а также помогает наблюдать за макросредой и корректировать направления развития в зависимости от политических и макроэкономических факторов, в том числе наличия внешнеэкономических связей и стимулирующих инновационную

деятельность инвестиций. Изучение приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры, исходя из показателей внешней среды и иных региональных инновационных стратегий соседствующих субъектов, позволяет органам местного самоуправления разрабатывать адаптивные долгосрочные Стратегии социально-экономического развития, приоритетные для общего функционирования национальной инновационной системы страны [28, С. 594]. Системы создания, распространения и применения знаний образуют триаду инновационно-инвестиционного потенциала региона с ключевыми элементами принятия стратегических решений – науки, образования и бизнеса – взаимодействие которых приводит к образованию

региональных инновационных кластеров – предельной форме отождествления с высоким уровнем инновационно-инвестиционного потенциала.

Региональная политика содействия образованию инновационной инфраструктуры в таком случае заключается в улучшении взаимоотношений между заинтересованными сторонами за счет обеспечения информационной доступности и формирования благоприятного инвестиционного климата для успешного финансирования инноваций [11, С. 481]. Деятельность основообразующих элементов региональной инновационной системы направлена на эффективную реализацию Стратегии социально-экономического развития в условиях определения приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона, значительно повышающих конкурентоспособность и инвестиционную привлекательность субъекта Российской Федерации. Многообразие факторов, которое необходимо учитывать при формировании региональной инновационной системы, обосновывает дифференцированный подход к разработке стратегий развития, когда состав и структура РИС зависит от внутренних социально-экономических показателей, продуктивности деятельности хозяйствующих субъектов, уровня обеспеченности инновационной инфраструктурой, благоприятного инвестиционного климата, институционального потенциала и других возможностей [9, С. 1315; 27, С. 99].

Выводы и рекомендации. В данной работе было выявлено, что инновационное развитие на мезоуровне зависит от качества проработанности региональных Стратегий, которые определяют социально-экономическую политику субъектов Российской Федерации и отражают направления развития пространственно-отраслевой структуры, механизмы для формирования и поддержки инновационной и инвестиционной инфраструктуры.

Дифференцированный подход в случае систем, располагающихся на мезоуровне – обязательный элемент в определении приоритетов развития, способствующий возникновению региональной инновационной системы и триады элементов инновационно-инвестиционного потенциала: системы создания,

распространения и применения знаний (инноваций).

Инновационно-инвестиционный потенциал отдельных социально-экономических систем мезоуровня, который включен в региональную инновационную систему в результате разработки Стратегий СЭР при определении приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона, также является определяющим при формировании национальной инновационной системы. Для перехода с экспортно-сырьевой модели экономики в постиндустриальное общество важно разрабатывать и внедрять оптимальные механизмы реализации региональной инвестиционной и инновационной политики в синергетическом и динамическом взаимодействии подсистем, обеспечивающих непрерывную циркуляцию знаний, инвестиционных потоков и человеческого капитала.

Анализ ССЭР Северо-Западного федерального округа, а также положения субъектов СЗФО в избранных рейтингах социально-экономического развития позволил выявить взаимосвязь между задачами инновационной и социально-экономической политики. Те субъекты, Стратегии которых содержат приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры, а также механизмы для формирования и поддержания инновационной и инвестиционной инфраструктуры, в избранных рейтингах социально-экономического развития занимают лидирующие положения (Санкт-Петербург, Калининградская область, Ленинградская область, Вологодская область) в отличие от субъектов, кто в приоритеты Стратегий социально-экономического развития вышеуказанные направления не ставит (Республика Коми, Псковская область, Ненецкий автономный округ, Республика Карелия). Ряд субъектов (Архангельская область, Новгородская область, Мурманская область) находятся на переходном этапе, где оценивать взаимообусловленность уровня инновационно-инвестиционного потенциала и социально-экономического развития, а также приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры проблематично в связи со значительной дифференциацией полученных оценок. Следовательно, прогрессивное развитие ряда субъектов Северо-Западного федерального округа,

определяющих приоритетные направления пространственно-отраслевой структуры региона, частично подтверждает авторскую гипотезу, связанную с предположением о важности взаимообусловленности приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры региона при разработке эффективных Стратегий социально-экономического развития, достижения заявленных показателей и усиления инновационно-инвестиционного потенциала.

Дальнейшее исследование планируется масштабировать на оставшиеся субъекты Российской Федерации, изучив положение в

избранных российских рейтингах, а также проанализировав Стратегии социально-экономического развития с точки зрения авторских показателей оценки, учитывающих наличие в Стратегии приоритетных направлений пространственно-отраслевой структуры, отражения инновационного и инвестиционного потенциала. Для отстающих субъектов Северо-Западного федерального округа предполагается разработка рекомендаций по совершенствованию Стратегий с учетом оценок, полученных в контексте данной научно-исследовательской работы.

Список источников

1. Великороссов В. В., Лисенкер Н. Л. Пространственная парадигма формирования инновационной системы на мезоуровне // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 3. № 9. С. 147–156.
2. Криворотов В. В. Проблемы устойчивого развития социально-экономических систем / В. В. Криворотов, О. И. Никонов, В. П. Ануфриев и др.; под научн. ред. А. И. Татаркина и В. В. Криворотова; Минобрнауки и науки РФ, Урал. федер. ун-т им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина, РАН УрО, Ин-т экономики. – Москва: Экономика, 2012. – 556 с.
3. Saitkasimov A. Innovation and social development // The American Journal of Social Science and Education Innovations. 2021. Т. 3 (04). С. 728–735. (In Eng.). DOI: 10.37547/tajssei/Volume03Issue04-117.
4. Никитская Е. Ф., Валишвили М. А. Взаимообусловленность инновационного и инвестиционного потенциалов регионов // Путеводитель предпринимателя. 2016. № 32. С. 157–167.
5. Правительство Российской Федерации. Концепция технологического развития на период до 2030 года: офиц. текст. – Москва, 2023. – 59 с.
6. Балашов А. И. Формирование региональной инновационной системы в Санкт-Петербурге / А. И. Балашов, Е. М. Рогова, И. А. Рудская // Экономическое возрождение России. 2015. № 1 (43). С. 95–115.
7. Васюхин О. В., Павлова Е. А. Развитие инновационного потенциала промышленного предприятия: монография. – Москва: Издательство «Академия Естествознания», 2010. – 175 с.
8. Маннапов Р. Г., Ахтариева Л. Г. Организационно-экономический механизм управления регионом: формирование, функционирование, развитие – Москва: КНОРУС, 2008. – 352 с.
9. Суховой А. Ф., Голова И. М. Дифференциация стратегий инновационного развития регионов как условие повышения эффективности социально-экономической политики в РФ // Экономика региона. 2020. Т. 16. № 4. С. 1302–1317. DOI: 10.17059/ekon.reg.2020-4-20.
10. Голубева А. С. Пространственное развитие территорий: эколого-экономический дискурс / А. С. Голубева, Е. А. Павлова, А. Р. Волков // Стратегии и инструменты управления экономикой: устойчивое развитие и технологическая трансформация: материалы X

References

1. Velikorossov V. V., Lisenker N. L. Spatial Paradigm of the Innovation System Formation at the Mesolevel. *Ekonomika i upravleniye: problemy, resheniyav*. 2018. Vol. 3. No. 9. pp. 147–156. (In Russ.).
2. Krivorotov V. V., et al Problems of Sustainable Development of Socio-Economic Systems. Under the scientific editorship of A. I. Tatarkin and V. V. Krivorotov. *Ural Federal University named after The First President of Russia B. N. Yeltsin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Economics*. Moscow: *Economika*. 2012. 556 p. (In Russ.).
3. Saitkasimov A. Innovation and Social Development. *The American Journal of Social Science and Education Innovations*. 2021. Vol. 3 (04). pp. 728–735. DOI: 10.37547/tajssei/Volume03Issue04-117.
4. Nikitskaya E. F., Valishvili M. A. Interdependence of Innovation and Investment Potentials of Entrepreneur's Guide. *Putevoditel' predprinimatel'ya*. 2016. No. 32. pp. 157–167. (In Russ.).
5. Government of the Russian Federation. Concept of Technological Development for the Period up to 2030: Official Text. *Moscow*. 2023. 59 p. (In Russ.).
6. Balashov A. I., Rogova E. M., Rudskaya I. A. Formation of the Regional Innovation System in St. Petersburg. *Ekonomicheskoye vozrozhdeniye Rossii*. 2015. No. 1 (43). pp. 95–115. (In Russ.).
7. Vasyukhin O. V., Pavlova E. A. Development of Innovative Potential of an Industrial Enterprise: a Monograph. *Moscow. Akademiya Yestestvoznaniya Publishing House*. 2010. pp. 175. (In Russ.).
8. Mannapov, R. G., Akhtarieva L. G. Organizational and Economic Mechanism of the Region Management: Formation, Functioning, Development. *Moscow: KNORUS*. 2008. 352 p. (In Russ.).
9. Sukhovei A. F., Golova I. M. Differentiation of Strategies of Innovative Development of Regions as a Condition for Improving the Efficiency of Socio-Economic Policy in the Russian Federation. *Ekonomika regiona*. 2020. Vol. 16. No. 4. pp. 1302–1317. (In Russ.). DOI: 10.17059/ekon.reg.2020-4-20.
10. Golubeva, A. S., at al. Spatial Development of Territories: Ecological and Economic Discourse. *Strategies and tools of economic management: sustainable development and technological transformation: proceedings of the X*

- Международной научно-практической конференции (СПб, 18 мая 2022 г.). 2023. С. 109–114.
11. Cooke P., Uranga M. G., Etxebarria G. Regional innovation systems: institutional and organisational dimensions // *Research Policy*. 1997. Т. 26. С. 475–491. (In Eng.). DOI: 10.1016/S0048-7333(97)00025-5.
12. Jiří Blažek, Vojtěch Kadlec. Knowledge bases, R&D structure and socio-economic and innovation performance of European regions // *Innovation: The European Journal of Social Science Research*. 2018. Т. 32 (4). С. 26–47. (In Eng.). DOI: 10.1080/13511610.2018.1491000.
13. Методические заметки от StratPlan.ru «Российские рейтинги регионов, сентябрь 2023» // StratPlan.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stratplan.ru/89/>
14. Губанова Е. С., Москвина О. С. Методологические аспекты оценки инвестиционно-инновационного потенциала региона // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2020. Т. 13. № 2. С. 41–55. DOI: 10.15838/esc.2020.2.68.3.
15. Москвина О. С., Неспанова И. В., Труханова А. С. Исследование инвестиционно-инновационного потенциала регионов Северо-Западного федерального округа // *Креативная экономика*. 2022. Т. 16. № 3. С. 1101–1116. DOI: 10.18334/ce.16.3.114430.
16. Porter M. E., Scott S., at al. National Innovative Capacity // *The Global Competitiveness Report 2001–2002*. – New York: Oxford University Press. 2002. – 17 p. (In Eng.).
17. Рейтинг социально-экономического положения регионов по итогам 2021 г. // РИА Рейтинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://riarating.ru/infografika/20220516/630222174.html>.
18. Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации. Выпуск 8 / В. Л. Абашкин, Г. И. Абдрахманова, С. В. Бредихин и др.; под ред. Л. М. Гохберга; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – Москва: НИУ ВШЭ, 2023. – 260 с.
19. Консорциум Леонтьевский центр – AV Group // Индекс конкурентоспособности регионов России 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://stratplan.ru/UserFiles/Files/AV%20RCI%202021a_210524.pdf.
20. Курочкина А. А., Головкин П. Н. Ресурсный потенциал сферы облачных инфокоммуникационных услуг в российских регионах: сравнительная оценка // *Экономика. Право. Инновации*. 2024. № 3. С. 4–11. DOI: 10.17586/2713-1874-2024-3-4-11.
21. Aksu G., Güzeller C., Eser T. The effect of the normalization method used in different sample sizes on the success of artificial neural network model // *International Journal of Assessment Tools in Education*. 2019. Т. 6 (2). С. 170–192. (In Eng.). DOI: 10.21449/ijate.479404.
22. Волков А. Р., Голубева А. С. Сравнительный анализ стратегических приоритетов социально-экономического развития субъектов Северо-Западного федерального округа // Развитие территориальных социально-экономических систем. Вопросы теории и практики: Сборник научных статей. 2022. С. 25–29.
23. Лукин Е. В., Кудревич А. Ю. Экономическое развитие регионов Северо-Запада России в 2021 году: *International Scientific and Practical Conference (St. Petersburg, May 18, 2022)*. 2023. pp. 109–114. (In Russ.).
11. Cooke P., Uranga M. G., Etxebarria G. Regional Innovation Systems: Institutional and Organizational Dimensions. *Research Policy*. 1997. Vol. 26. pp. 475–491. DOI: 10.1016/S0048-7333(97)00025-5.
12. Jiří Blažek, Vojtěch Kadlec. Knowledge Bases, R&D Structure and Socio-Economic and Innovation Performance of European Regions. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*. 2018. Vol. 32 (4). pp. 26–47. doi: 10.1080/13511610.2018.1491000.
13. Methodological Notes from StratPlan.ru «Russian Ratings of Regions, September 2023». *Internet-portal StratPlan.ru*. Available at: <https://stratplan.ru/89/> (In Russ.).
14. Gubanova E. S., Moskvina O. S. Methodological Aspects of Assessing the Investment and Innovation Potential of the Region. *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*. 2020. Vol. 13. No. 2. pp. 41–55. (In Russ.). DOI: 10.15838/esc.2020.2.68.3.
15. Moskvina O. S., Nespánova I. V., Trukhanova A. S. Research of Investment and Innovation Potential of the Regions of the North-West Federal District. *Kreativnaya ekonomika* 2022. Vol. 16. No 3. pp. 1101–1116. (In Russ.). DOI: 10.18334/ce.16.3.114430.
16. Porter M. E., Scott S., at al. National Innovative Capacity. *The Global Competitiveness Report 2001–2002*. New York: Oxford University Press. 2002. 17 p.
17. Rating of Socio-Economic Situation of the Regions According to the Results of 2021. *RIA Rating*. Available at: <https://riarating.ru/infografika/20220516/630222174.html>. (In Russ.).
18. Rating of Innovative Development of the Subjects of the Russian Federation. Issue 8 / V. L. Abashkin, G. I. Abdrakhmanova, S. V. Bredikhin, et al.; ed. by L. M. Gokhberg; National Research University Higher School of Economics. *Moscow: National Research University Higher School of Economics*. 2023. 260 p. (In Russ.).
19. Leontief Center Consortium – AV Group. *Index of competitiveness of Russian regions*. 2021. Available at: https://stratplan.ru/UserFiles/Files/AV%20RCI%202021a_210524.pdf. (In Russ.).
20. Kurochkina A. A., Golovkin P. N. Resource Potential of the Cloud Infocommunication Services Sphere in Russian Regions: Comparative Assessment. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 3. pp. 4–11. (In Russ.). DOI: 10.17586/2713-1874-2024-3-4-11.
21. Aksu G., Güzeller C., Eser T. The Effect of the Normalization Method Used in Different Sample Sizes on the Success of Artificial Neural Network Model. *International Journal of Assessment Tools in Education*. 2019. Vol. 6 (2). pp. 170–192. DOI: 10.21449/ijate.479404.
22. Volkov A. R., Golubeva A. S. Comparative Analysis of Strategic Priorities of Socio-Economic Development of the subjects of the North-West Federal District. *Development of territorial socio-economic systems. Issues of theory and practice: Collection of scientific articles*. 2022. pp. 25–29. (In Russ.).
23. Lukin E. V., Kudrevich A. Yu. Economic Development of the Regions of North-West Russia in 2021: a Starting

- отправная точка для новых трендов // Вопросы территориального развития. 2022. № 2. 18 с.
DOI: 10.15838/tdi.2022.2.62.
24. Глухих П. Л. Оценка сбалансированности направлений внешнеэкономического развития на примере СЗФО // Российский внешнеэкономический вестник. 2021. № 9. С. 49–58.
DOI: 10.24411/2072-8042-2021-9-49-58.
25. Соболев Т. С. Анализ состояния качества жизни населения северо-западного федерального округа // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2021. № 2 (55). С. 193–212.
26. Рисин И. Е. Оценка качества стратегий социально-экономического развития регионов // РЕГИОН: системы, экономика, управление. 2022. № 1 (56). С. 41–48.
27. Суханова П. А. Модель региональной инновационной системы: отечественные и зарубежные подходы к изучению региональных инновационных систем // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2015. № 4 (27). С. 92–102.
28. Кандрокова М. М., Туменова С. А. Региональная инновационная система: модель, структура, особенности // Россия: тенденции и перспективы развития. 2015. № 10–3. С. 589–595.
- Point for New Trends. *Voprosy territorial'nogo razvitiya*. 2022. No. 2. pp. 18. (In Russ.).
DOI: 10.15838/tdi.2022.2.62.
24. Glukhikh, P. L. Assessment of the Balance of Foreign Economic Development Directions on the Example of the North-West Federal. *Rossiyskiy vneshneekonomicheskii vestnik*. 2021. No. 9. pp. 49–58. (In Russ.).
DOI: 10.24411/2072-8042-2021-9-49-58.
25. Sobol T. S. Analysis of the State of the Quality of Life of the Population of the North-West Federal District. *Nauchnyy vestnik: finansy, banki, investitsii*. 2021. No. 2 (55). pp. 193–212. (In Russ.).
26. Rysin I. E. Evaluation of the Quality of Strategies of Socio-Economic Development of Regions. *REGION: sistemy, ekonomika, upravleniye*. 2022. No. 1 (56). pp. 41–48. (In Russ.).
27. Sukhanova P. A. Model of the Regional Innovation System: Domestic and Foreign Approaches to the Study of Regional Innovation Systems. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika*. 2015. No. 4 (27). pp. 92–102. (In Russ.).
28. Kandrokova M. M., Tumenova S. A. Regional Innovation System: Model, Structure, Features. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya*. 2015. No. 10–3. pp. 589–595. (In Russ.).

Научная статья
УДК 656.025
doi: 10.17586/2713-1874-2024-4-21-29

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ И АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ В ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКЕ

Любовь Николаевна Иванова¹, Сергей Евгеньевич Иванов²

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия, 45is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6880-0897>

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, serg_ie@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2366-9458>
Язык статьи – русский

Аннотация: В статье анализируются ключевые методы оптимизации и планирования, применяемые для транспортной логистики. Рассмотрен алгоритм с применением моделей на графах для формирования оптимальных маршрутов перевозок с учетом основных логистических факторов. В отличие от классической задачи маршрутизации для транспортной логистики в представленной работе авторами применяются многофакторная оценка и адаптивная эвристика. Предложенная авторами эвристика учитывает не только расстояние, но и важные логистические параметры, такие как затраты на топливо и время прохождения участка пути. Применяемая многофакторная оценка позволяет построить уточненную графовую модель и получить оптимальные маршруты, учитывающие множество факторов, что повышает эффективность, снижает затраты и время доставки. Решаемая авторами задача многокритериальной оптимизации маршрутов имеет практическое применение для маршрутизации доставки товаров крупных маркетплейсов в пункты выдачи с учетом множества факторов. Для решения поставленной задачи авторами представлен многофакторный метод оптимизации маршрутов A* с адаптивной эвристикой. Для инструментального обеспечения логистических систем на языке объектно-ориентированного программирования C# реализован алгоритм в виде библиотеки. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют решать задачи оптимизации, планирования и развития сектора транспортно-логистических услуг.

Ключевые слова: алгоритм построения маршрутов, методы оптимизации перевозок, транспортная логистика

Ссылка для цитирования: Иванова Л. Н., Иванов С. Е. Методы оптимизации и алгоритм маршрутизации в транспортной логистике // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 4. С. 21–29. <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-21-29>.

OPTIMIZATION METHODS AND ROUTING ALGORITHM IN TRANSPORT LOGISTICS

Lubov N. Ivanova¹, Sergei E. Ivanov²

¹SMTU, Saint Petersburg, Russia, 45is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6880-0897>

²ITMO University, Saint Petersburg, Russia, serg_ie@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2366-9458>
Article in Russian

Abstract: The article analyzes the key optimization and planning methods used for transport logistics. An algorithm using graph models for the formation of optimal transportation routes, taking into account the main logistical factors, is considered. In contrast to the classical routing problem for transport logistics, the authors use multifactorial assessment and adaptive heuristics in the presented work. The heuristics proposed by the authors takes into account not only the distance, but also important logistic parameters, such as fuel costs and the time of passage of the route section. The applied multifactorial assessment allows us to build a refined graph model and obtain optimal routes that take into account many factors, which increases efficiency, reduces costs and delivery time. The problem of multi-criteria route optimization solved by the authors has practical application for routing the delivery of goods from large marketplaces to pick-up points taking into account many factors. To solve the problem, the authors present a multi-factor route optimization method A* with adaptive heuristics. For instrumental support of logistics systems in the object-oriented programming language C#, an algorithm is implemented in the form of a library. The developed algorithm and software allow solving problems of optimization, planning and development of the transport and logistics services sector.

Keywords: algorithm for constructing routes, methods of transportation optimization, transport logistics

For citation: Ivanova L. N., Ivanov S. E. Optimization Methods and Routing Algorithm in Transport Logistics. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 4. pp. 21–29. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-21-29>.

Введение. Транспортная логистика решает задачи планирования, реализации и контроля перемещения грузов и включает в себя выбор оптимальных маршрутов, средств передвижения и методов доставки, а также управление запасами и складскими процессами. Важной, ключевой задачей транспортной логистики является минимизация затрат при обеспечении своевременной доставки. Выполнение этой задачи возможно, если учитываются следующие факторы: расстояние, тип груза, условия дорожного движения, тарифы, время, расход топлива и многие другие. Применение современных цифровых технологий позволяет автоматизировать процессы транспортной логистики, улучшать мониторинг грузов и повышать эффективность перевозок. Для повышения конкурентоспособности в условиях глобализации транспортным компаниям необходимо оптимизировать свои логистические процессы. Кроме того, оптимизация маршрутов позволяет улучшить экологическую атмосферу, снизить углеродные выбросы. Компании стремятся сократить негативное воздействие на окружающую среду посредством оптимизации маршрутов.

Важным фактором в транспортной логистике является эффективное и бесперебойное движение товаров. Цепочка поставок является комплексным процессом, включающим этапы движения товара от производства до потребителя. Главными компонентами цепочки поставок являются: поставщики, производство, складирование, транспортировка, распределение и обратная логистика. При определении оптимальных маршрутов и технических средств доставки очень важны аспекты своевременной доставки и повышения удовлетворенности клиентов.

Эффективное управление цепочкой поставок позволяет:

- снизить затраты на производство и транспортировку;
- увеличить скорость доставки товаров;
- улучшить качество обслуживания клиентов;
- повысить гибкость системы и оперативно реагировать на изменения спроса и рыночные условия.

В современных меняющихся условиях применение цифровых технологий для

управления цепочкой поставок позволяет получить существенные конкурентные преимущества на рынке. Отлаженные цепочки поставок должны оперативно реагировать на изменения логистических центров, складов, производства. Кроме того, постоянное изменение спроса на товары изменяют нагрузку на логистическую сеть и пропускную способность. При этом необходимо учитывать множество меняющихся факторов: ограничения логистических центров, сроки поставок, транспортные мощности, уровень запрашиваемого сервиса, издержки, пропускную способность, нагрузку, время планирования, географию транспортной сети, виды транспортных средств, условия доставки, параметры груза, доступность транспортных средств и многие другие. При планировании перевозок необходима оптимизация маршрута и стоимости доставки, минимизация порожнего пробега, снижение сроков доставки и затрат на виды транспортных средств.

Логистические системы играют основную роль в управлении цепочками поставок. Надежное инструментальное обеспечение необходимо для эффективного функционирования логистических систем. Инструментальное обеспечение включает в себя программные и аппаратные средства, которые используются для управления логистическими процессами. Основные компоненты инструментального обеспечения включают: программное обеспечение для управления цепочками поставок (SCM), системы управления складом (WMS), системы управления транспортом (TMS) для планирования маршрутов, управления грузоперевозками и отслеживания доставки. Аппаратные средства обеспечивают сбор данных и автоматизацию процессов и включают сканеры штрих-кодов, RFID-метки, мобильные устройства.

Архитектура логистических систем может быть представлена на нескольких уровнях. Уровень стратегического управления цепочками поставок необходим для выбора поставщиков, распределении ресурсов и разработки долгосрочных планов. Уровень тактического управления необходим для планирования производства, управления запасами и оптимизации транспортных маршрутов. Уровень операционного управления необходим для ежедневной обработки заказов,

управления складом и транспортировкой. Следовательно, инструментальное обеспечение и архитектура логистических систем являются основой для эффективного управления цепочками поставок.

Цель исследования и постановка задачи. Ключевой аспект в транспортной логистике – оптимизация маршрута – позволяет повысить эффективности транспортировки грузов. Оптимизация маршрутов уменьшает расходы на топливо и амортизацию транспортных средств. Эффективные маршруты сокращают время в пути, что повышает удовлетворенность клиентов работой логистической системы и позволяет быстро реагировать на изменение спроса. Также оптимизация маршрутов способствует уменьшению выбросов за счет снижения пробега. Целью работы является разработка методов и инструментальных средств, позволяющих решать задачи оптимизации маршрутов, планирования и развитие сектора транспортно-логистических услуг.

На сегодняшний день для транспортной логистики остаются актуальными несколько практических задач маршрутизации, которые требуют решения и дальнейшего совершенствования. Одной из них является задача многокритериальной оптимизации маршрутов с одновременным учетом различных критериев, таких как затраты на топливо, время доставки, а также экологические факторы. Учитывая повышенное внимание к экологической составляющей, логистические компании стремятся уменьшать углеродный след, выбирая экологически чистые маршруты.

Решаемая авторами задача многокритериальной оптимизации маршрутов имеет практическое применение для маршрутизации доставки товаров крупных маркетплейсов в пункты выдачи с учетом множества факторов. Для решения данной задачи авторами представлен многофакторный метод оптимизации маршрутов A^* с адаптивной эвристикой. Метод позволяет учесть посредством многофакторной оценки различные критерии. Для экологически чистых маршрутов в графовой модели многокритериальной оптимизации нормализованные коэффициенты имеют вес менее 0,5 и такие маршруты получаются более оптимальными.

В транспортной логистике при определении оптимального маршрута в рассматриваемой задаче учитывается ряд факторов, таких как затраты на топливо, время прохождения участка пути. Решается задача построения многофакторной графовой модели и применения к ней адаптированного алгоритма A^* . Для решения задачи авторами представлена адаптивная эвристика, учитывающая специфические условия, такие как время движения по разным участкам дорог, затраты. Выполняются предобработка, масштабирование, усреднение выбранных логистических факторов.

Новизна работы заключается в обработке логистических факторов, их математическом представлении, многофакторной оценке, в представлении адаптивной эвристики, в построении многофакторной графовой модели и применении модифицированного для транспортной логистики алгоритма A^* .

Литературный обзор. В последние годы было опубликовано множество статей, освещающих различные аспекты транспортной логистики. Многие статьи акцентируют внимание на внедрении новых технологий в транспортной логистике. Это включает автоматизацию, роботизацию, применение дронов для доставки товаров и автономных грузовиков. Технологии интернет вещей (IoT) позволяют отслеживать местоположение и состояние грузов в реальном времени. Анализ больших объемов данных помогает компаниям оптимизировать маршруты и предсказывать спрос. Обзор статей о транспортной логистике показывает, что эта область активно развивается под влиянием технологий, экологических требований и глобальных изменений. Компании, стремящиеся оставаться конкурентоспособными, должны адаптироваться к новым условиям, внедряя инновации и оптимизируя свои процессы.

Рассмотрим научные работы по современным технологиям и методам, применяемым в транспортной логистике. В рассмотренных ниже работах [1–14] на основе различных методов и подходов решается задача однокритериальной оптимизации маршрутов. В отличие от изученных научных работ, мы представляем многофакторный метод оптимизации маршрутов A^* с адаптивной эвристикой, который позволяет более эффективно

проводить оптимизацию и при этом учитывать множество различных факторов.

В работе [1] предлагается оптимизация методов транспортной логистики с помощью внедрения инновационных управляющих технологий. Цель проводимого исследования, помимо оценки эффективности варианта транспорта и определения результативности логистического предприятия, – формирование комплекса решений для мультимодальных перевозок. В качестве очень важного аспекта исследования можно выделить выстраивание концепции по зеленой логистике и экологичности транспорта. Следует обратить внимание на то, что в работе [1] не решена проблема многокритериальной оптимизации маршрутов мультимодальных перевозок с учетом совместимости различных транспортных средств.

В работе [2] исследованы оптимизационные способы управления с помощью искусственного интеллекта с учетом обязательной цифровизации предприятия. Предложенная автором интегрированная модель включает координационные составляющие и деятельность персонала. Следует отметить, что применение искусственного интеллекта для задачи управления и оптимизации логистической цепочки поставок имеет множество нерешенных проблем. Например, помимо высокой стоимости решения, отсутствие требуемых объемов корректных и актуальных данных для обучения приводит к крайне неэффективным решениям.

В работе [3] рассматриваются возможности цифровизации промышленного предприятия для управления логистикой с учетом результативности использования материальных ресурсов и в зависимости от потребностей конечных потребителей. В исследовании применены ключевые индикаторы эффективности логистических процессов промышленного предприятия, в частности, производительность и качество обслуживания. Авторы предлагают свою оценку результативности объединения метода бенчмаркинга и показателей ключевой производительности (KPI). Данные оценки применимы для крупных промышленных предприятий и результаты оценки могут существенно расходиться с традиционными методами прогнозирования и стратегического планирования.

В работе [4] рассматриваются главные аспекты оптимизации управления цепочками поставок для результативности деятельности транспортной логистики и повышения конкурентоспособности предприятия. Для достижения поставленных целей авторами предложена специализированная система управления цепями поставок (SCMS), которая включает планирование, мониторинг и контроль материальных и финансовых ресурсов. Однако применение разработанной системы требует существенных затрат на внедрение, обучение персонала, что в основном подходит для крупных предприятий.

Основная цель исследований в работе [5] – предложения по снижению транспортных расходов при доставке необходимых товаров в конкретную определенную точку маршрута с использованием преимуществ распределительной логистики. Итогом исследования стали рекомендации по применению совокупности способов оптимизации распределенной транспортной логистики с возможностью снижения расходов, стоимости, повышения скорости процессов для комфортного и удобного взаимодействия заказчика и поставщика. Следует отметить, что в исследовании не представлены практические методы и алгоритмы для многокритериальной оптимизации маршрутов.

В работе [6] исследуются актуальные методы оптимизации процессов транспортной логистики предприятий с применением высокотехнологичных инноваций, с учетом предпочтений конечных потребителей и, главное, в контексте изменений в международной торговле. Рассматриваются разного вида стратегии управления логистическими цепочками поставок, для определения результативности практических инструментов оптимизации транспортных процессов. Проведен анализ следующих аспектов: выход на новые рынки, рост уровня электронной коммерции, повышение централизации и градостроительство умных городов. В рамках исследования не представлены алгоритмы многокритериальной оптимизации маршрутов.

В работе [7] рассматриваются возможности оптимизации и повышения надежности системы маршрутизации логистической системы предприятий с помощью инновационных продуктов. Нельзя обойти вниманием

предлагаемые авторами динамические адаптивные алгоритмы, с помощью которых можно выбирать альтернативные маршруты в соответствии с текущими условиями. К недостаткам применения динамических адаптивных алгоритмов относят высокие вычислительные затраты, переобучение, необходимость постоянного обновления моделей, параметров и сильную зависимость от актуальности, точности входных данных.

В основе работы [8] лежит концепция достижения результативности в логистических цепочках поставок при минимизации, снижении расходов при точном соблюдении требований конечного потребителя. Помимо главных финансовых показателей учитываются такие важные аспекты, как необходимость различных видов страхования и специфичность груза. В рамках работы выделен основной фактор при управлении транспортной логистикой и не применяются модели многофакторной оптимизации.

В работе [9] рассматриваются возможности и результаты использования технологий искусственного интеллекта для оптимизации маршрутов в транспортной автомобильной логистической системе. Предполагается, что применение высокотехнологичных продуктов в логистической системе российских предприятий является перспективным и развивающим данную предметную область направлением. Недостатками применения искусственного интеллекта для оптимизации маршрутов являются: высокие вычислительные затраты, необходимость больших объемов точных и актуальных данных, риск переобучения, сложность интерпретации и адаптации к изменениям.

В ходе исследований [10] разработана логическая последовательность построения цифровой экосистемы региональной транспортно-логистической технологической инфраструктуры. Цифровой информационный ресурс строится как единая комплексная транспортно-производственная платформа, что соответствует стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года. В работе представлены только общие этапы построения технологической транспортно-логистической инфраструктуры без указания конкретных алгоритмов оптимизации и методов отбора факторов.

В работе [11] проводится координация управленческих решений и изучение возможности применения математического моделирования, методов машинного обучения и сетевого анализа для достижения оптимизации процессов логистической системы цепочек поставок. Особое внимание направлено на комплексные решения в стратегиях управления рисками, на использование аналитических систематических методов. Однако, в работе не представлен сравнительный анализ моделей и методов оптимизации маршрутов в транспортной логистике.

В работе [12] автор конкретизирует, исследует и классифицирует вероятные риски работы системы цепочек поставок транспортной логистики. Оптимизация маршрутов гарантирует эффективное управление поставками, соблюдение экологических нормативов, грамотное складирование, безопасную транспортировку и доставку грузов, при этом следует в обязательном порядке учитывать логистические риски, в том числе и форс-мажоры, непредвиденные обстоятельства. В работе не отражено, что корректный учет логистических рисков возможен только при наличии достаточного объема качественных, актуальных данных, при выявлении всех потенциальных рисков и изменений, включая экономические колебания.

В работе [13] исследуются методы оптимизации логистических цепей поставок в контексте достижения необходимого уровня рентабельности предприятия. В рамках анализа конкурентоспособности оценивают показатели деятельности поставщиков и пожелания конечных потребителей с точки зрения стратегического планирования. По мнению авторов, наилучшим вариантом является динамичная стратегия для развития конкурентного преимущества предприятия. Однако динамичная стратегия требует постоянного мониторинга и анализа данных, имеет высокие затраты на адаптацию, высокий риск неэффективности без точных данных, сложного анализа результатов и сложности в координации подразделений.

В рамках исследования [14] изучается проблемная транспортная логистическая система в Санкт-Петербурге и других мегаполисах с возможностью применения высокотехнологичных инноваций. Представлены дан-

ные наблюдения фаз работы светофоров с сложных перекрестков и предложено использовать моделирование для результативности работы транспортной сети. В работе проводится только статистический анализ собранных данных, не представлены методы решения задачи оптимизации маршрутов транспортной системы.

В приведенных работах используемые алгоритмы не учитывают важные внешние факторы для построения транспортных маршрутов. Кроме того, предложенные в обзоре традиционные методы оптимизации маршрутов основаны на алгоритме Дейкстры и некорректно работают для графовых моделей с отрицательными весовыми коэффициентами.

Многофакторный метод оптимизации маршрутов A^* с адаптивной эвристикой. Оптимизация маршрута в логистике – это не только способ снижения затрат, но и важный элемент повышения конкурентоспособности компании. С использованием современных технологий и методов компании могут значительно улучшить свои логистические процессы, что в конечном итоге ведет к повышению удовлетворенности клиентов и устойчивому развитию бизнеса.

Рассмотрим традиционные методы оптимизации маршрутов. Широко применяются алгоритмы маршрутизации на графовых моделях: алгоритм Дейкстры и алгоритм ближайшего соседа предназначены для поиска наиболее эффективных маршрутов между заданными точками. Алгоритм Дейкстры демонстрирует высокую эффективность при работе с небольшими сетями, обеспечивая быстрое определение оптимальных маршрутов. Алгоритм A^* [15, 16] представляет собой модификацию алгоритма Дейкстры, улучшает его функциональные возможности и использует эвристическую функцию для ускорения поиска. Впервые алгоритм A^* был представлен в работе авторов Питера Харта, Нисана Карпа и Реймонда Рубина [17]. Эвристический метод ближайшего соседа не всегда дает оптимальное решение, но легко реализуется и быстро работает. Генетический алгоритм эффективно обрабатывает сложные задачи маршрутизации с множеством переменных.

Модели на графах играют важную роль в оптимизации маршрутов перевозок. В контексте логистики узлы графа представляют склады, транспортные узлы, потребительские точки. Рёбра графа отражают транспортные маршруты между этими узлами, а также содержат информацию о расстоянии, времени доставки или стоимости перевозки. Модели на графах являются мощным инструментом для решения широкого спектра задач в логистике.

Авторами представлен эффективный алгоритм для оптимизации маршрутов грузовых и пассажирских перевозок на основе графовых моделей с учетом логистических факторов, таких как: стоимость перевозок, расстояние, тип груза, условия дорожного движения, тарифы, время доставки, расход топлива, экологические факторы. Для приведения всех факторов к единой шкале измерения выполняется масштабирование и нормализация. После чего вводятся весовые коэффициенты посредством усреднения нормализованных факторов.

Графовая модель строится на основе географических карт, узлы графа представляют перекрестки, ребра имеют определенные веса. Для решения задачи оптимизации применен модифицированный алгоритм A^* [15], который определяет наилучший маршрут для транспортной логистики с учетом главных параметров. Авторами применяются многофакторная оценка и адаптивная эвристика, которая учитывает не только расстояние, но и важные логистические параметры.

Алгоритм A^* строит маршрут для графовой модели с минимальной стоимостью, применяя оценочную функцию:

$$F(x) = E(x) + C(x), \quad (1)$$

где $E(x)$ – адаптивная эвристическая функция, которая представляет оценку стоимости пути от текущей до конечной вершины.

$$E(x) = M(x) L, \quad (2)$$

здесь $M(x)$ – манхэттенское расстояние, равное сумме модулей разностей географических координат двух вершин.

Для географических координат манхэттенское расстояние рассчитывается по формуле:

$$M(x) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|, \quad (3)$$

где x_1, x_2 – широты соседних вершин - перекрестков, y_1, y_2 – долгота.

Применяемая эвристическая функция является допустимой, она является монотонной. В работе [16] показано, что любая монотонная эвристика является допустимой. Здесь L – среднее арифметическое нормализованных логистических параметров f_i для участка (время для участка, расход топлива для участка):

$$L = 1/n \sum ((f_i - \min(f_i))/(\max(f_i) - \min(f_i))), \quad (4)$$

В графовой модели для каждого участка между двумя смежными узлами рассчитывается свой нормализованный усредненный коэффициент L .

Здесь $C(x)$ – оценка пути из стартовой вершины, равная $C(x) = G(x) L$, где $G(x)$ – наименьшая стоимость пути из начальной вершины в текущую.

Согласно алгоритму A^* [16], на каждом шаге просматриваются все пути из стартовой вершины в целевую для поиска минимального значения функции $F(x)$. Определяются пути из начальной вершины в другие нерассмотренные вершины, которые записываются в очередь с приоритетом. Условие завершения алгоритма является просмотр всего графа или минимальное значение $F(x)$ в очереди. Таким образом, с помощью очереди определяется оптимальное решение с минимальной стоимостью.

Рассмотрим основные этапы алгоритма A^* [15].

1) Стартовая вершина графа записывается в открытый список.

2) Выполняется основной цикл пока открытый список не пустой или не содержит конечной вершины.

а) Выбирается верхняя вершина из открытого списка.

б) Обрабатывается выбранная вершину. Проверяется вершина на проходимость. Вычисляется оценка $F(x)$ через этот узел.

с) Обрабатываются смежные вершины графа.

Для обработки выполняются следующие действия.

– Проверяется смежная вершина на проходимость. В случае непроходимости вершины выполняется переход к смежной.

– Далее рассчитывается оценка $F(x)$ в соответствии с формулой.

– Выполняется поиск смежной вершины в списке и сравнение оценки с вычисленной. Если находим, то сравниваем ее оценку пути от начальной вершины графа с рассчитанной оценкой. При лучшей оценке выполняется переход к смежной вершине. В противном случае вершина удаляется из списка.

– Далее выполняется пересчет оценки пути до целевой вершины.

д) Размещается рассматриваемая вершина в список.

е) Выполняется завершение основного цикла

3) Выводится найденный путь с минимальной стоимостью.

Проведенные оценки модифицированного алгоритма показывают вычислительную сложность алгоритма $O((x+y)\log x)$, где x, y – количество вершин и ребер модели в графе. В сравнении с широко применяемым алгоритмом Дейкстры со сложностью $O(x^2+y)$, предложенный алгоритм – более быстрый и может рассчитывать маршруты в режиме реального времени. Кроме того, алгоритм Дейкстры не применим для моделирования с отрицательными весовыми коэффициентами. С применением языка объектно-ориентированного программирования $C\#$ реализован алгоритм в виде библиотеки и выполнено моделирование модифицированным алгоритмом «Звезда» различных примеров на дорожной карте. Библиотека на языке $C\#$ реализует следующие методы для классов: добавление и удаление вершин и ребер ориентированного графа, вычисление функций стоимости, эвристическая функция расстояния, определение пути с минимальной стоимостью. Для реализации на языке $C\#$ использовались массивы, матрицы, списки, структуры *Generic*.

Выводы. Рассмотрены основные методы оптимизации и планирования грузовых и пассажирских перевозок. Предложен алгоритм на графовой модели для построения оптимальных маршрутов перевозок с учетом основных логистических параметров.

В транспортной логистике при определении оптимального маршрута в рассматриваемой задаче учитывается ряд факторов, такие как затраты на топливо, время прохождения участка пути. Решается задача построения многофакторной графовой модели и применения к ней адаптированного алгоритма A^* . Предложенная авторами эвристика учитывает не только расстояние, но и важные логистические параметры, такие как затраты на топливо и время прохождения участка пути. Выполняются предобработка, масштабирование, усреднение выбранных логистических факторов. Применяемая многофакторная оценка позволяет построить уточненную графовую модель и получить оптимальные маршруты, учитывающие множество факторов, что повышает эффективность и снижает затраты, время доставки. Результаты работы заключаются в обработке логистических факторов, их математическом представлении, многофакторной оценки, в представлении

адаптивной эвристики, в построении многофакторной графовой модели и применении модифицированного для транспортной логистики алгоритма A^* .

Для инструментального обеспечения логистических систем на языке объектно-ориентированного программирования C# реализован алгоритм в виде библиотеки. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют решать задачи оптимизации и развития сектора транспортно-логистических услуг. Представленный алгоритм является важным инструментом для построения оптимальных маршрутов перевозок с учетом различных логистических параметров. Применение разработанной библиотеки в логистических задачах ведет к повышению эффективности бизнеса и снижению затрат. В условиях быстро меняющегося рынка использование современных цифровых инструментов становится неотъемлемой частью успешной логистической стратегии.

Список источников

1. Мамметэсенова А., Гыратлыев С. Анализ эффективности использования различных видов транспорта в логистической цепи // *Всемирный ученый*. 2024. Т. 1. № 16. С. 256–261.
2. Горский М. М. Логистическая цепь поставок: управление и оптимизация // *Сборник научных разработок аспирантов Московской международной академии*. 2024. № 2. С. 54–56.
3. Малышев А. Е. Анализ методов оптимизации управления логистической системой компании // *Вестник науки*. 2024. Т. 5. № 3 (72). С. 127–131.
4. Атаева А., Мьяликов Н. Разработка системы управления цепочками поставок для повышения эффективности транспортной логистики // *Всемирный ученый*. 2024. Т. 1. № 21. 7 с.
5. Брынских И. Д., Синенков М. В. Методы оптимизации процесса перевозки грузов по распределительной сети // *Вестник науки*. 2024. № 4 (73). С. 41–45.
6. Какалыева А., Керими К. Оптимизация процессов в транспортной логистике: современные подходы, инновации и вызовы в контексте глобализации // *Всемирный ученый*. 2024. Т. 1. № 25. 8 с.
7. Новоселова В. М., Клековкин В. С. Оптимизация системы маршрутизации в транспортной логистике: принципы и перспективы // *Вестник науки*. 2024. № 5 (74). С. 1215–1222.
8. Калужский Г. Р. Формирование логистических решений управления транспортировкой в цепях поставок // *Экономика и социум*. 2024. № 3-1 (118). С. 653–656.
9. Данилочкина Н. Г., Лысенко А. А. Оптимизация логистических маршрутов посредством применения технологий искусственного интеллекта // *Научные труды*

References

1. Mammetesenova A., Gytratlyev S. Analysis of the Effectiveness of the Use of Various Modes of Transport in the Logistics Chain. *Vsemirnyy uchenyy*. 2024. Vol. 1. No. 16. pp. 256–261. (In Russ.).
2. Gorsky M. M. Logistics Supply Chain: Management and Optimization. *Collection of scientific developments of postgraduate students of the Moscow International Academy*. 2024. No. 2. pp. 54–56. (In Russ.).
3. Malyshev A. E. Analysis of Methods for Optimizing the Management of a Company's Logistics System. *Vestnik nauki*. 2024. Vol. 5. No. 3 (72). pp. 127–131. (In Russ.).
4. Ataeva A., Myalikov N. Development of a Supply Chain Management System to Improve the Efficiency of Transport Logistics. *Vsemirnyy uchenyy*. 2024. Vol. 1. No. 21. 7 p. (In Russ.).
5. Brynskikh I. D., Sinenkov M. V. Methods for Optimizing the Process of Cargo Transportation Along the Distribution Network. *Vestnik nauki*. 2024. No. 4 (73). pp. 41–45. (In Russ.).
6. Kakalyeva A., Kerimi K. Optimization of Processes in Transport Logistics: Modern Approaches, Innovations and Challenges in the Context of Globalization. *Vsemirnyy uchenyy*. 2024. Vol. 1. No. 25. 8 p. (In Russ.).
7. Novoselova V.M., Klekovkin V.S. Optimization of the Routing System in Transport Logistics: Principles and Prospects. *Vestnik nauki*. 2024. No. 5 (74). pp. 1215–1222. (In Russ.).
8. Kaluzhskiy G. R. Formation of Logistics Solutions for Transportation Management in Supply Chains. *Ekonomika i sotsium*. 2024. No. 3-1 (118). pp. 653–656. (In Russ.).
9. Danilochkina N. G., Lysenko A. A. Optimization of Logistics Routes Through the Use of Artificial Intelligence Technologies. *Nauchnyye trudy Vol'nogo*

- Вольного экономического общества России. 2024. Т. 246. № 2. С. 298–314.
10. Булатова Н. Н., Дудин В. С., Алексеев А. В. Формирование цифровой экосистемы региональной транспортно-логистической инфраструктуры // *π-Economy*. 2024. Т. 17. № 3. С. 68–80.
11. Рогунин Р. С. Обзор методов управления цепочками поставок: будущие, настоящие и прошлые подходы к моделированию // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. 2023. № 2. С. 164–179.
12. Пономарева Е. С. Логистические риски в транспортной деятельности и способы их минимизации // *Молодой исследователь Дона*. 2024. № 9 (2). С. 58–61.
13. Акопова Е. С., Полуботко А. А., Самыгин С. И. Особенности стратегического планирования и управления логистическими цепями поставок // *Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки*. 2024. № 2. С. 103–108.
14. Кудряева Д. В. Анализ интенсивности загрузки транспортной сети для моделирования // *Системный анализ и логистика*. 2024. № 2. С. 40.
15. Иванова Л. Н. Методы построения эффективных транспортных маршрутов в логистике грузоперевозок // *Счисляевские чтения: актуальные проблемы экономики и управления*. 2024. № 12 (12). С. 113–121.
16. Dechter R., Pearl J. Generalized best-first search strategies and the optimality of A* // *Journal of the Association for Computing Machinery*. 1985. Т. 32. № 3. С. 505–536. (In Eng.).
17. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. Т. 4. № 2. С. 100–107. (In Eng.).
- ekonomicheskogo obshchestva Rossii*. 2024. Vol. 246. No. 2. pp. 298–314. (In Russ.).
10. Bulatova N. N., Dudin V. S., Alekseev A. V. Formation of a Digital Ecosystem of Regional Transport and Logistics Infrastructure. *π-Economy*. 2024. Vol. 17. No. 3. pp. 68–80. (In Russ.).
11. Rogulin R.S. Review of Supply Chain Management Methods: Future, Present and Past Approaches to Modeling. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment»*. 2023. No. 2. pp. 164–179. (In Russ.).
12. Ponomareva E.S. Logistics Risks in Transport Activities and Ways to Minimize them. *Molodoy issledovatel' Dona*. 2024. No. 9 (2). pp. 58–61. (In Russ.).
13. Akopova E. S., Polubotko A. A., Samygin S. I. Features of Strategic Planning and Management of Supply Chain Logistics. *Gumanitarnyye, sotsial'no-ekonomicheskkiye i obshche-stvennyye nauki*. 2024. No. 2. pp. 103–108. (In Russ.).
14. Kudryaeva D. V. Analysis of the Intensity of Loading of the Transport Network for Modeling. *Sistemnyy analiz i logistika*. 2024. No. 2. P. 40. (In Russ.).
15. Ivanova L. N. Methods of Building Effective Transport Routes in the Logistics of Cargo *Transportation. Schislyayevskiy chteniya: aktual'nyye problemy ekonomiki i upravleniya*. 2024. No. 12(12). pp. 113–121. (In Russ.).
16. Dechter R., Pearl J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A*. *Journal of the Association for Computing Machinery*. 1985. Vol. 32. No. 3. pp. 505–536.
17. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. Vol. 4. No. 2. pp. 100–107.

Научная статья
УДК 656; 65.011.56; 330.47
doi: 10.17586/2713-1874-2024-4-30-39

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0 В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Мария Вячеславовна Сысоенко¹, *Анна Сергеевна Лебедева²*

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, sysoenko.m@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0004-5248-3101>

²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия, aslebedeva11@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5353-3885>

Язык статьи – русский

Аннотация: Интенсивное развитие цифровых технологий, их активное внедрение в сфере транспорта и логистики обуславливает необходимость изучения их влияния на транспортную систему, в частности на уровень ее интеллектуализации. Это позволит установить какие технологии Индустрии 4.0 необходимо внедрять в первую очередь для достижения наилучших параметров развития интеллектуальных транспортных систем. В связи с этим в работе анализируются различные технологии Индустрии 4.0, определяются возможные способы их применения для решения задач в контексте функционирования интеллектуальных транспортных систем и их элементов, получаемые эффекты от их внедрения для сферы транспорта и логистики. На основе анализа выявляются возможные параметры влияния технологий на развитие интеллектуальных транспортных систем, к которым относятся физическая и экологическая безопасность работы транспорта, информационная обеспеченность, скорость и точность принятия решений, физическая безопасность работы транспорта, эффективность использования ресурсов, удобство и комфорт, наличие развлекательной составляющей и др. На основе сопоставления выявленных параметров с конкретными видами цифровых технологий определяется какие технологии имеют большее влияние на интеллектуализацию транспортных систем. К таким технологиям относится интернет вещей, дополненная реальность и облачные решения. Также определяются параметры, которые в большей степени подвержены воздействию цифровых технологий: безопасность и эффективность транспортных систем. Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки стратегических решений при реализации концепции Индустрии 4.0 в сфере транспорта и логистики.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, инновационные технологии, интеллектуальные транспортные системы, цифровизация

Ссылка для цитирования: Сысоенко М. В., Лебедева А. С. Анализ применения технологий Индустрии 4.0 в интеллектуальных транспортных системах // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 4. С. 30–39. <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-30-39>.

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES IN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS

Maria V. Sysoenko¹, *Anna S. Lebedeva²*

¹ITMO University, Saint Petersburg, Russia, sysoenko.m@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0004-5248-3101>

²SMTU, Saint Petersburg, Russia, aslebedeva11@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5353-3885>

Article in Russian

Abstract: The intensive development of digital technologies, their active implementation in the field of transport and logistics necessitates the study of their impact on the transport system, in particular on the level of its intellectualization. This will allow us to determine which technologies of Industry 4.0 need to be implemented first of all in order to achieve the best parameters for the development of intelligent transport systems. In this regard, the paper analyzes various technologies of Industry 4.0, identifies possible ways of their application to solve problems in the context of the functioning of intelligent transport systems and their elements. Based on the analysis, possible parameters of the impact of technologies on the development of intelligent transport systems are identified, which include physical and environmental safety of transport, information security, speed and accuracy of decision-making, physical safety of transport, resource efficiency, convenience and comfort, the presence of an entertainment component, etc. Based on the comparison of the identified parameters with specific types of digital technologies, it is determined which technologies have a greater impact on the intellectualization of transport systems. These technologies include the Internet of Things, augmented reality AR and cloud solutions. The parameters that are more susceptible to the effects of digital technologies are also determined:

the safety and efficiency of transport systems. The results obtained are of practical importance for the development of strategic solutions in the implementation of the concept of Industry 4.0 in the field of transport and logistics.

Keywords: digitalization, Industry 4.0, innovative technologies, intelligent transport systems

For citation: Sysoenko M. M., Lebedeva A. S. Analysis of the Application of Industry 4.0 Technologies in Intelligent Transport Systems. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 4. pp. 30–39. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-30-39>.

Введение. Динамичное изменение внешнего мира в контексте политической и экономической ситуации обуславливает потребность внедрения инновационных технологий, способствующих переходу предприятий на новый уровень развития. Наиболее востребованными являются технологии Индустрии 4.0 (цифровые технологии), которые обеспечивают революционные трансформации различных отраслей экономики, в первую очередь, промышленности и транспорта. В сфере транспорта и логистики цифровые технологии имеют особое значение, так как благодаря использованию новейших технологических решений возникают новые возможности для снижения издержек, улучшения качества продукции и повышения уровня сервиса в транспортной индустрии.

Именно поэтому проблематика цифровизации и интеллектуализации процессов на транспорте становится все более актуальной как с точки зрения практических вопросов реализации, так и с точки зрения научно-исследовательской деятельности.

Литературный обзор. Общие теоретические положения реализации концепции Индустрии 4.0, в том числе особенности ее реализации на транспорте, были исследованы в работах таких авторов, как Семчук Д. Б., Осинцев Н.А., Ahuett-Garza H., Kurfess T., Fedorko G., Karishma M. Qureshi, Bhavesh G. Mewada, Kunrath T.L., Dresch A., Veit D.R., Siddiqui A., Khan M., Rashid R. и др. [11, 17–21].

Перспективы и опыт внедрения цифровых технологий в транспортно-логистической деятельности изучены в работах Балуева М. С., Виноградова А. Б., Зайченко И. М., Каменкова А. Л., Смагулова А. А., Сумина Д. А. [1, 3, 6, 7, 12, 14]. Непосредственно вопросы интеллектуализации транспортных систем и внедрения конкретных инновационных технологий для управления их элементами рассматривали Беляков А. А., Гущина М. В., Ермалина О. В., Лопаткин Г. А., Маркелов В. М., Медникова О. В., Степанян А. Ж.,

Фастович Г. Г., Шамлицкий Я. И. и др. [2, 4, 5, 7–10, 13, 15, 16].

Однако проблематика влияния конкретных цифровых технологий на процесс интеллектуализации транспортных систем является недостаточно изученной, что определило цель данного исследования.

Целью работы является определение влияния конкретных технологий Индустрии 4.0 на развитие интеллектуальных транспортных систем.

Методы и материалы исследования. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи.

1) Определить основные способы применения технологий Индустрии 4.0 в контексте элементов интеллектуальных транспортных системах.

2) Выявить параметры изменения интеллектуальных транспортных систем под воздействием достижений Индустрии 4.0;

3) Проанализировать влияние технологий Индустрии 4.0 на интеллектуальные транспортные системы.

Объектом исследования являются интеллектуальные транспортные системы, а предметом – способы применения цифровых технологий в интеллектуальных транспортных системах.

В работе используются методы формальной логики, анализа, графоаналитический метод, построение матриц взаимодействия.

Результаты исследования. Интеллектуальная транспортная система (или ИТС) является фундаментальным элементом в глобальном транспортном секторе и с точки зрения теории объясняется как совокупность технологий и инфраструктуры, направленных на создание более эффективной, безопасной и экологически чистой транспортной среды [9]. Таким образом, основная цель интеллектуализации транспортных систем заключается в повышении уровня безопасности и эффективности транспорта, что может быть реализовано только на основе применения таких тех-

нологий концепции Индустрия 4.0 как интернет вещей, возможности машинного обучения и автоматизации, которые помогают значительно повысить показатели функционирования рынка транспортных услуг. На практике ИТС состоят из нескольких ключевых элементов: деревья управления транспортным потоком, технологии управления грузом и транспортом, интеллектуальные транспортные системы мониторинга и технологии управления парковкой.

Под деревьями управления транспортным потоком подразумевается информация, которая необходима для функционирования транспорта в целом в соответствии с ожиданиями и потребностями пользователей [5]. Данный элемент реализуется на основе технических решений Индустрии 4.0, которые моделируют динамику транспортных потоков в режиме реального времени, что позволяет предотвратить пробки, устранить проблемы низкой производительности автомобилей и эффективно распределить потоки на основе информации о местонахождении и потребностях пользователей. Понятие технологий управления грузом и транспортом объясняется через способы улучшения производительности и качества грузоперевозок [2].

Сегодня продолжают активно развиваться и в большем объёме внедряться на транспорте такие технологии, как RFID-системы, GPS-навигация и датчики, позволяющие автоматизировать процессы мониторинга и управления транспортировкой грузов. Благодаря этому становится возможным уменьшение непредвиденных задержек и улучшение точности сборки и доставки товара в соответствии с требованиями потребителей. Экспертами анализируемой отрасли интеллектуальные системы мониторинга рассматриваются с точки зрения наблюдения за транспортным потоком в режиме реального времени [16]. Это объясняется тем, что подобные технологии позволяют быстро выявлять и решать проблемы в системе на основе данных о трафике, возможных опасностях в виде погодных условий и ремонтных работ. Технологии управления парковкой используются для решения основной одноимённой проблемы транспортной сети [4]. Благодаря современным техническим возможностям в таких системах применяются датчики,

обеспечивающие доступность парковочных мест и позволяющие эффективно использовать городское пространство.

Интеллектуальные транспортные системы являются одним из ключевых направлений развития транспортной индустрии в 21 веке. Современные технологические инновации охватывают множество областей человеческой деятельности с целью оптимизировать и усовершенствовать процессы с помощью таких достижений Индустрии 4.0, как блокчейн (БЧ), большие данные (БД), облачные технологии (ОТ), дополненная реальность (ДР), интернет вещей (ИВ), прогнозная аналитика (ПА), автоматизация и робототехника (АВР), носимая электроника (НЭ), 3D-печать (3Д) и дроны (АТСД).

Рассматривая достижения Индустрии 4.0 в контексте ИТС, можно сделать вывод, что каждая из них находит свое применение для решения задач транспорта и логистики. Блокчейн создаёт более безопасное и эффективное управление транспортными средствами, используя технологию распределенного реестра для учета и управления данными о движении на дорогах [15]. Также разрабатываются системы управления трафиком на основе данных о движении, создаются системы управления транспортным потоком, что позволяет в целом увеличить уровень безопасности на дорогах. Наряду с этим, блокчейн может использоваться для создания автоматических платежных систем для транспорта, включая оплату проезда на общественном транспорте, платежи за парковку и оплату за использование инфраструктуры для зарядки электромобилей. Интеллектуальные контракты на основе блокчейн-технологии могут быть настроены на автоматическое изменение параметров сделки при наступлении определенных условий, например, автоматически могут быть предоставлены скидки на транспортные услуги при достижении определенного количества поездок. Аналогичная технология также может быть использована для решения задач хранения и обмена информацией о транспортных средствах, их состоянии, пробеге, данных о техническом обслуживании и ремонте и т.п., с обеспечением доступа к информации широкому кругу пользователей. Кроме того, данная технология, применяемая в контексте управления энергопотреблением

в течение суток, связана с процессом распределения энергии между электромобилями, электрическими зарядными устройствами.

Технологии обработки больших данных (Big Data) являются неотъемлемой частью ИТС, поскольку они помогают обрабатывать и анализировать значительные массивы информации, собираемой датчиками, камерами, мобильными устройствами и другими инструментами мониторинга [7]. К основным задачам сферы транспорта и логистики, решаемым с помощью данной технологии, можно отнести следующие.

1) Прогнозирование интенсивности транспортных потоков, вероятности и плотности заторов и пробок. При развитии аналитической и прогностической функции технологий больших данных возможно будет полностью автоматизировать управление дорожным движением, производить изменение маршрутизации в реальном времени, принимать оптимальные решения по развитию городской инфраструктуры.

2) Сбор и анализ информации о состоянии транспортных средств, включая пробег, расход топлива и другие параметры для оптимизации ресурсов и затрат с целью повышения эксплуатационной эффективности.

3) Выявление факторов опасности на дороге и предупреждение водителей о потенциальных рисках, к которым могут относиться непредвиденные события, остановки транспорта, появление препятствий, резкое изменение погодных условий, наличие опасных участков, что снижает вероятность дорожно-транспортных происшествий.

4) Совершенствование функционала мобильных приложений для городского пассажирского транспорта за счет анализа и корректировки карты маршрутов на основе данных о расписании и транспортном потоке, обеспечения возможности пополнения проездных карт и электронных кошельков для оплаты парковки.

5) Повышение точности и своевременности принятия решений по планированию ремонта дорожной инфраструктуры, управлению парковочным пространством и транспортным потоком умных городов.

Автономные транспортные средства (АТС), беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются еще одной технологией

Индустрии 4.0, которая позволяет повысить безопасность, эффективность и экологичность транспортной системы [13] по следующим причинам:

– АТС не требуют соблюдения режима труда и отдыха водителей и могут непрерывно осуществлять транспортировку грузов;

– алгоритмы работы АТС настраиваются на экономичный стиль вождения при соблюдении всех правил дорожного движения, что благоприятно отражается на экологической и физической безопасности транспорта;

– БПЛА способны доставлять груз в труднодоступные для обычных транспортных средств места, а также работать в условиях чрезвычайных ситуаций.

Кроме того, при участии в дорожном движении более предсказуемых АТС процесс автоматизированного централизованного управления транспортными потоками становится проще, среднее время в пути при этом сокращается. Стоит отметить, что АТС и БПЛА также имеют специфические области применения и могут использоваться для мониторинга дорожного движения, патрулирования, поиска пропавших людей, обеспечения транспортной мобильности отдельных групп населения с ограниченными возможностями передвижения.

Технологии дополненной реальности (AR) в контексте интеллектуализации транспортных систем являются инструментом отображения навигационной и иной актуальной информации на лобовом стекле автомобиля. Такой подход позволяет упростить процесс управления транспортным средством, снизить вероятность ошибок, повысить внимательность водителя к дорожной обстановке, предупреждающим знакам и сигналам [12]. Это, в свою очередь, оказывает влияние на безопасность дорожного движения, стиль вождения. Также виртуальная реальность (VR) может быть использована в процессе обучения управлению разными видами транспорта, в том числе в экстремальных условиях. Для пассажиров VR-технологии представляют интерес с точки зрения создания интерактивных развлекательных приложений и игр, которые снижают напряжение во время длительных поездок.

Интернет вещей (IoT) может быть использован в ИТС для сбора и анализа данных,

управления транспортными средствами и инфраструктурой, обеспечения безопасности на дорогах и создания более эффективной и экологически чистой транспортной среды [10]. С этим нельзя не согласиться, так как сегодня IoT-датчики могут собирать данные о транспорте, дорогах, погодных условиях, заторах и других факторах, которые могут влиять на движение транспорта, позволяя в дальнейшем использовать полученную информацию для автоматической регулировки транспортного потока и улучшения безопасности дорожного движения. Наряду с этим, интернет вещей используется для обеспечения удаленного управления транспортными средствами и мониторинга их состояния через IoT-датчики, способные обнаруживать поломки в транспортных средствах и отправлять автоматические оповещения о необходимости ремонта. Используя данные о транспортном потоке и текущем местоположении транспортных средств, IoT-технологии могут помочь оптимизировать маршруты и уменьшить время в пути, на основе регулировки светофоров, управления дорожными знаками. Технологии интернета вещей способны повысить безопасность на дорогах, предупреждая водителей о близости пешеходов или велосипедистов, а также о различных непредвиденных ситуациях на дороге.

В интеграции с датчиками интернета вещей (IoT) облачные решения формируют условия для эффективного мониторинга дорожного движения, что позволяет прогнозировать трафик. Они также облегчают процесс координации и взаимодействия различных видов транспорта при организации мультимодальных перевозок. Использование облачных решений обеспечивает более быстрый и надежный доступ к информации о транспортных потоках, дорожно-транспортных происшествиях, нарушениях [14], что является важным условием функционирования ИТС.

Несмотря на то, что на первый взгляд, технологии 3D-печать не связана с ИТС, некоторые эксперты имеют противоположное мнение [3]. Данная технология применяется для создания деталей, запасных частей и комбинаций отдельных компонентов, что позволяет существенно сократить длительность производственного цикла и себестоимость элементов, входящих в ИТС. В условиях

санкций роль технологии 3D-моделирования возрастает, обеспечивая ИТС необходимыми запасными частями для механических, оптических, электрических и других типов датчиков. Кроме того, использование 3D-печати для ускорения процесса создания прототипов сложных технических систем, их тестирования и испытания, положительно влияет в целом на развитие инновационных транспортных технологий.

Следующей технологией Индустрии 4.0 является носимая электроника. Она часто используется для контроля состояния водителей, оптимизации обслуживания общественного транспорта [8]. Браслеты и часы, отслеживая частоту сердечных сокращений, уровень стресса, усталость и другие физиологические показатели водителей, определяют его готовность к управлению транспортным средством. Также устройства могут участвовать в обнаружении пассажиров в случае возникновения чрезвычайной ситуации, внедряться для контроля доступа в салон транспортного средства и ограничения движения на определенных участках дороги. Данная технология применяется для установления местонахождения, считывания данных о системе оплаты проезда и изменениях в расписании общественного транспорта.

Прогнозная аналитика в ИТС используется для предсказания будущих событий и их влияния на транспортную систему, что позволяет разрабатывать стратегии для оптимизации движения транспортных средств и повышения эффективности работы системы в целом. Применение прогнозной аналитики может улучшить управляемость транспортной системой и снизить затраты на ее эксплуатацию [6]. Прогнозируя пассажиропоток на определенном участке дороги или на конкретной остановке, ИТС получают возможность определять оптимальное количество транспортных средств для обслуживания пассажиров, что, в свою очередь, повышает эффективность и качество транспортной системы. Используя данные о дорожном трафике, ИТС прогнозирует вероятные заторы и предлагает альтернативные маршруты движения для общественного транспорта. На основе ретроспективных данных о дорожно-транспортных происшествиях, ремонтно-технических остановках транспортных средств и

других инцидентах инструменты прогнозной аналитики рассчитывают вероятность возникновения подобных событий в будущем для принятия мер по их предотвращению в настоящем.

Оценка текущего состояния и планирование будущих изменений дорожной сети с помощью прогнозной аналитики помогает оптимизировать расходы на дорожное строительство и ремонт. Наряду с этим, с помощью анализа и прогнозирования данных о состоянии транспортных средств, их загрузки, местоположении и других параметров ИТС могут оптимизировать их использование, повышая уровень обслуживания и освобождая ресурсы для других целей.

Такие инновационные достижения Индустрии 4.0, как автоматизированные или роботизированные устройства, позволяют повысить точность и скорость транспортных процессов, а также снизить затраты на перевозку грузов и пассажиров, что в дальнейшем в целом уменьшит издержки на производство [1]. Роботизированные процессы производства и сборки транспортных средств могут повысить точность и скорость выпуска и обслуживания транспортных средств, а также осуществлять непрерывную проверку и диагностику неисправностей для проведения своевременного технического обслуживания и ремонта. Важным является и экологический аспект данной технологии, позволяющей на своей основе разработать более экологически

чистые транспортные средства и оптимизировать их работу в экологически чувствительных регионах.

Таким образом, все рассмотренные выше цифровые технологии так или иначе оказывают влияние на развитие элементов ИТС. Однако параметры, на которые они влияют, будут разными. Так, одни будут повышать доступность разных видов транспорта, а другие будут связаны с качеством перевозок. Выделим основные параметры влияния технологий на ИТС:

- физическая безопасность работы транспорта;
- оптимизация ресурсов;
- комфортная среда;
- оптимизация инфраструктуры;
- эффективность транспортной системы;
- доступность транспорта;
- удобство использования транспорта;
- информационная обеспеченность;
- развлекательная среда;
- скорость и точность принятия решений;
- повышение качества работы транспорта;
- экологическая безопасность транспорта.

На основании проведенного анализа применения технологий Индустрии 4.0 была сформирована матрица их влияния на ИТС, отражающая происходящие в них изменения под воздействием инноваций, представленная в таблице 1.

Таблица 1

Матрица влияния технологий Индустрии 4.0 на ИТС

Параметр влияния технологии на ИТС	Технология Индустрии 4.0									
	ИВ	ДР	ОТ	ВД	АТСД	БЧ	ЗД	НЭ	АВР	ПА
Физическая безопасность работы транспорта										
Оптимизация ресурсов										
Комфортная среда										
Оптимизация инфраструктуры										
Эффективность транспортной системы										
Доступность транспорта										
Удобство использования транспорта										
Информационная обеспеченность										

Параметр влияния технологии на ИТС	Технология Индустрии 4.0									
	ИВ	ДР	ОТ	БД	АТСД	БЧ	3D	НЭ	АВР	ПА
Развлекательная среда		■								
Скорость и точность принятия решений	■	■								
Повышение качества работы транспорта			■							■
Экологическая безопасность транспорта	■								■	

Условные обозначения: ИВ – интернет вещей; ДР – дополненная реальность; ОТ – облачные технологии; БД – большие данные; АТСД – автономные транспортные средства и дроны; БЧ – блокчейн; 3D – 3D-печать; НЭ – носимая электроника; АВР – автоматизация и роботизация; ПА – прогнозная аналитика.

На основе матрицы были составлены диаграммы, отражающие какие технологии имеют большее влияние на ИТС по обозначенным в матрице параметрам и какие

параметры в большей степени обеспечиваются за счет развития и внедрения цифровых технологий. Они представлены на рисунках 1 и рисунке 2, соответственно.

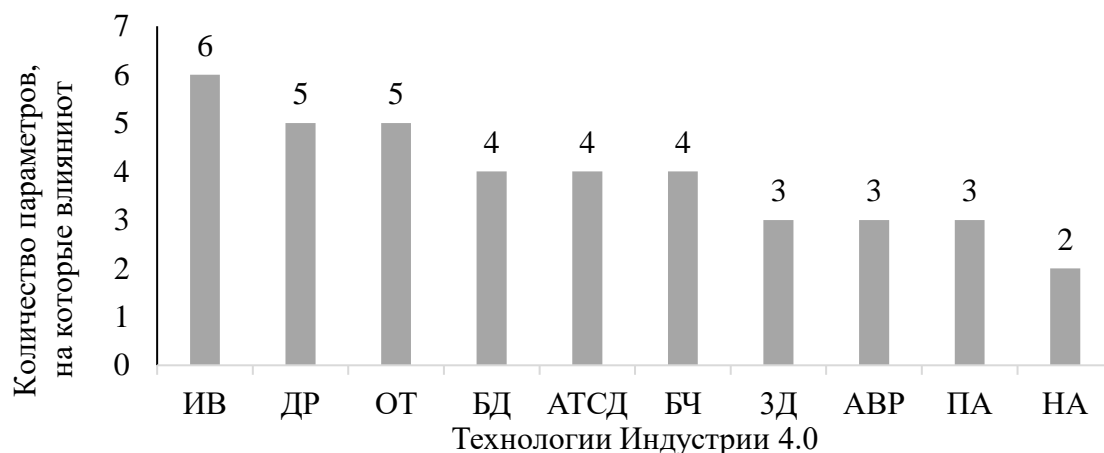


Рисунок 1 – Количество параметров, на которые оказывают влияние те или иные цифровые технологии

Исходя из проведенного исследования, интернет вещей оказывает влияние на большее количество параметров, а носимая электроника – на меньшее. Это объясняется тем, что технологии, не имеющие физического выражения и работающие за счёт различных сетей, имеют больше возможностей для выражения результатов функционирования. На втором месте по количеству параметров находится технология дополненной реальности, что отражает общий тренд рынка и общества на геймификацию происходящих процессов и перемену вектора внимания потребителей, в данном случае водителей, на ускорение получения информации о дорожных ситуациях. 3D-принтеры, автоматизация, роботизация и

прогнозная аналитика также имеют узкую функциональную направленность и применяются в отдельных направлениях транспортно-логистической деятельности.

Такие параметры, как безопасность и эффективность транспортных систем, требуют внедрения большего количества видов цифровых технологий, а для создания развлекательной среды достаточно одной технологии VR. Это обусловлено тем, что большинство технологий имеют направленность именно на работу с надёжностью ИТС и ее функционированием в соответствии с растущим трафиком и запросами дорожной среды. Достижения Индустрии 4.0, связанные с меньшим количеством технологий Индустрии 4.0,

формируют общие характеристики транспортной системы как с точки зрения её участников, потребителей, так и с точки зрения региональных тенденций.

Выводы и рекомендации. На основании проведённого исследования можно сделать вывод, что все основные технологии четвёртой промышленной революции, рассмотренные в работе, на сегодняшний день продолжают активное внедрение в ИТС. Они позволяют сделать их более безопасными, экономичными и эффективными, создают более удобную и комфортную среду для пассажиров и водителей. С помощью описанных инноваций происходит оптимизация городской инфраструктуры и увеличивается доступность и удобство транспортных систем для населения. Вместе с этим, улучшается информационная и интерактивная среда для пассажиров, а также осуществляется помощь водителям в принятии более осознанных решений на дороге. Значительное повышение уровня организации транспортных систем позволяет уменьшить время на планирование маршрутов, увеличить пропускную способность дорог и в целом повысить безопасность дорожного движения. С использованием инновационных технологий не только повышается эффективность производства, но и сокращается

его время и снижается стоимость создания продукции, что ускоряет процесс разработки ИТС и новых технологичных решений. Повышение общей эффективности и совершенствование работы системы в целом обеспечивает более безопасную и экологически чистую работу транспортных средств.

Однако в результате исследования были выявлены технологии Индустрии 4.0, которые оказывают наибольший эффект с точки зрения интеллектуализации транспорта и логистики, что определяет приоритетность их внедрения для достижения наилучших параметров развития ИТС. Данные практические рекомендации могут быть использованы для разработки положений стратегий развития транспортной системы РФ, а также для стратегического планирования деятельности и функционирования конкретных предприятий транспортной отрасли.

Применение достижений Индустрии 4.0 в ИТС ещё не до конца изучено, что обуславливает необходимость проведения новых исследований с целью изучения возможностей сохранения рабочих мест, обеспечения безопасности взаимодействия человека и технологий, а также соответствия вопросов законности и надёжности с получаемыми преимуществами для рынка.

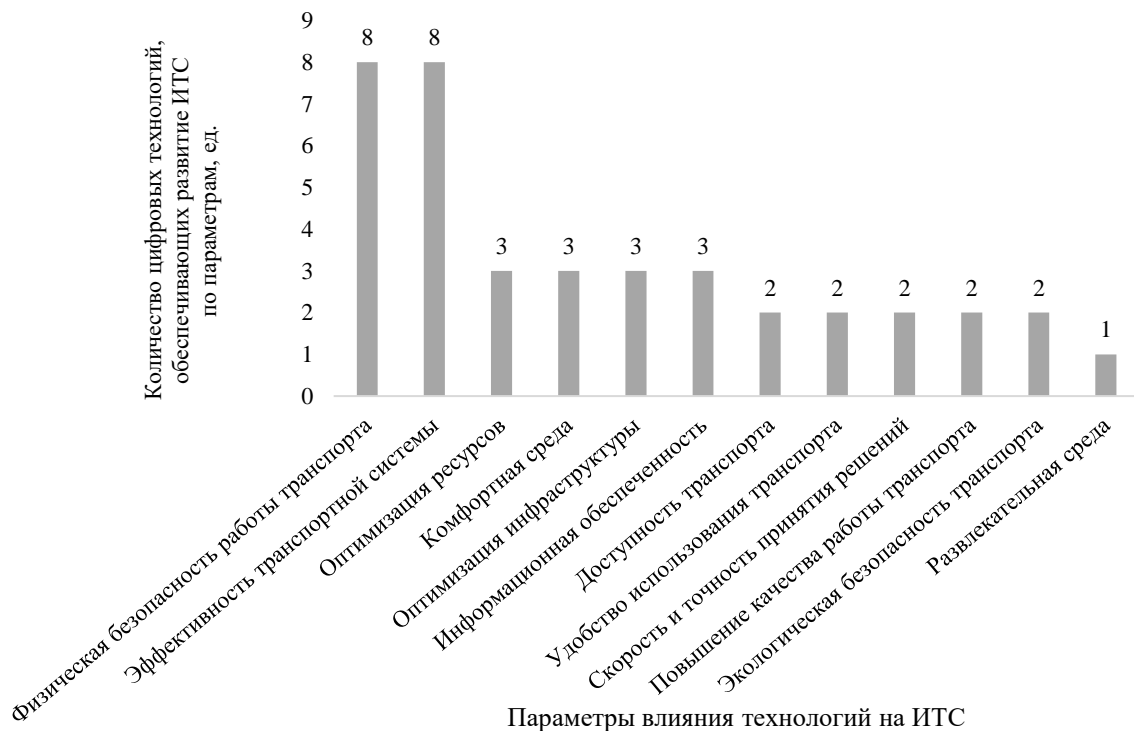


Рисунок 2 – Количество цифровых технологий, обеспечивающих развитие ИТС по тем или иным параметрам

Список источников

1. Балугев М. С. Перспективы использования робототехники для выполнения логистических работ // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. 2021. № 2 (48). С. 24–28.
2. Беляков А. А., Шулепов А. И. Система управления размещением грузов // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2021. № 93. С. 37–41.
3. Виноградов А. Б. Влияние трехмерной печати на логистику и управление цепями поставок (часть 1) // Логистика сегодня. 2015. № 5. С. 276–286.
4. Гуцина М. В. Управление современными механизмами организации парковочного пространства в мировой практике // Научный журнал молодых ученых. 2019. № 3. С. 58–69.
5. Ермилина О. В., Дёмина В. Д. Система управления транспортными потоками с использованием нечеткого регулятора на перекрестке // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8. С. 1–11.
6. Зайченко И. М. Предиктивная аналитика в управлении цепями поставок // Научный вестник Южного института менеджмента. 2019. № 2. С. 18–22.
7. Каменков А. Л. Применение больших данных для анализа пассажиропотока на скоростных магистралях Российской Федерации // Инновационные транспортные системы и технологии. 2020. № 2 (6). С. 106–115.
8. Лопаткин Г. А. Современное состояние логистических решений и пути их развития в условиях цифровизации экономики // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). 2020. № 2 (70). С. 65–74.
9. Маркелов В. М., Соловьев И. В., Цветков В. Я. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления // Economic Consultant. 2019. № 3. С. 42–49.
10. Медникова О. В. IoT в транспорте: как интернет вещей помогает избежать катастрофы, аварии и загруженность крупных городов // Вестник Академии знаний. 2019. № 33 (4). С. 154–158.
11. Семчук Д. Б., Осинцев Н. А. Систематизация принципов и технологий Индустрии 4.0 в устойчивых цепях поставок // Недропользование и транспортные системы. 2024. № 13 (2). С. 10–24.
12. Смагулов А. А. Дополненная реальность в логистике // Вопросы устойчивого развития общества. 2021. № 6. С. 560–568.
13. Степанян А. Ж. Проблемы регулирования беспилотных транспортных средств // Вестник Университета имени О. Е. Кутафина. 2019. № 4. С. 169–174.
14. Сумина Д. А. Применение облачных технологий на транспорте // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 1. С. 63–66.
15. Фастович Г. Г. К вопросу о применении современных технологий в логистических системах // Аграрное и земельное право. 2019. № 5 (173). С. 13–16.
16. Шамлицкий Я. И., Тихоненко Д. В. Системы мониторинга транспортных средств на основе ГЛОНАСС/GPS // Решетневские чтения. 2010. Т. 2. С. 661–662.
17. Ahuett-Garza H., Kurfess T. A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and

References

1. Baluev M. S. Prospects for Using Robotics to Perform Logistics Work. *Teoriya i praktika servisa: ekonomika, so-cial'naya sfera, tekhnologii*. 2021. No. 2 (48). pp. 24–28. (In Russ.).
2. Belyakov A. A., Shulepov A. I. Cargo Placement Management System. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*. 2021. No. 93. pp. 37–41. (In Russ.).
3. Vinogradov A. B. The Impact of 3D Printing on Logistics and Supply Chain Management (Part 1). *Logistika segodnya*. 2015. No. 5. pp. 276–286. (In Russ.).
4. Gushchina M. V. Management of Modern Mechanisms for Organizing Parking Space in World Practice. *Nauchnyj zhurnal molodyh uchenyh*. 2019. No. 3. pp. 58–69. (In Russ.).
5. Ermilina O. V., Dyomina V. D. Traffic Flow Management System Using Fuzzy Controller at Intersection. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2021. No. 8. pp. 1–11. (In Russ.).
6. Zajchenko I. M. Predictive Analytics in Supply Chain Management. *Nauchnyj vestnik Yuzhnogo instituta menedzhmenta*. 2019. No. 2. pp. 18–22. (In Russ.).
7. Kamenkov A. L. Application of Big Data for Passenger Flow Analysis on Highways of the Russian Federation. *Innovacionnye transportnye sistemy i tekhnologii*. 2020. No. 2 (6). pp. 106–115. (In Russ.).
8. Lopatkin G. A. Current State of Logistics Solutions and Ways of Their Development in the Context of Digitalization of the Economy. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINH)*. 2020. No. 2 (70). pp. 65–74. (In Russ.).
9. Markelov V. M., at all. Intelligent Transport Systems as a Management Tool. *Economic Consultant*. 2019. No. 3. pp. 42–49. (In Russ.).
10. Mednikova O. V. IoT in Transport: How the Internet of Things Helps to Avoid Disasters, Accidents and Congestion in Large Cities. *Vestnik Akademii znaniy*. 2019. No. 33 (4). pp. 154–158. (In Russ.).
11. Semchuk D. B., Osincev N. A. Systematization of Industry 4.0 Principles and Technologies in Sustainable Supply Chains. *Nedropol'zovanie i transportnye sistemy*. 2024. No. 13 (2). pp. 10–24. (In Russ.).
12. Smagulov A. A. Augmented Reality in Logistics. *Voprosy ustojchivogo razvitiya obshchestva*. 2021. No. 6. pp. 560–568. (In Russ.).
13. Stepanyan A. Zh. Problems of Regulation of Unmanned Vehicles. *Vestnik Universiteta imeni O. E. Kutafina*. 2019. No. 4. pp. 169–174. (In Russ.).
14. Sumina D. A. Application of Cloud Technologies in Transport. *Interekspo Geo-Sibir'*. 2019. No. 1. pp. 63–66. (In Russ.).
15. Fastovich G.G. On the Issue of Application of Modern Technologies in Logistics Systems. *Agrarnoe i zemel'noe pravo*. 2019. No. 5 (173). pp. 13–16. (In Russ.).
16. Shamlickij Ya.I., Tihonenko D. V. Vehicle Monitoring Systems Based on GLONASS/GPS. *Reshetnevskie chteniya*. 2010. Vol. 2. pp. 661–662. (In Russ.).
17. Ahuett-Garza H., Kurfess T. A Brief Discussion on the Trends of Habilitating Technologies for Industry 4.0 and

- Smart manufacturing // *Manufacturing Letters*. 2019. Т. 15. С. 60–63. (In Eng.).
18. Fedorko G. Implementation of Industry 4.0 in the belt conveyor transport // *MATEC Web of Conferences* 263. 2019. С. 1–6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/330734780_Implementation_of_Industry_40_in_the_belt_conveyor_transport (In Eng.).
19. Karishma M. Q., et al. Investigating industry 4.0 technologies in logistics 4.0 usage towards sustainable manufacturing supply chain // *Heliyon*. 2024. Т. 10. №. 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/380435630_Investigating_Industry_40_Technologies_in_Logistics_40_Usage_Towards_Sustainable_Manufacturing_Supply_Chain (In Eng.).
20. Kunrath T. L., Dresch A., Veit D. R. Supply chain management and industry 4.0: a theoretical approach // *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 2022. Т. 20 (1). С. 1263 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/364249699_Supply_chain_management_and_industry_40_a_theoretical_approach (In Eng.).
21. Siddiqui A., Khan M., Rashid R. Industry 4.0 Adoption in Transportation: Does Industry 4.0 Adoption Enhance Sustainability? A Systematic Literature Review // *International Journal of Supply and Operations Management*. 2024. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/378545597_Industry_40_Adoption_in_Transportation_Does_Industry_40_Adoption_Enhance_Sustainability_A_Systematic_Literature_Review (In Eng.).
- Smart Manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2019. Vol. 15. pp. 60–63.
18. Fedorko G. Implementation of Industry 4.0 in the Belt Conveyor Transport. *MATEC Web of Conferences* 263. 2019. pp. 1–6. Available at: https://www.researchgate.net/publication/330734780_Implementation_of_Industry_40_in_the_belt_conveyor_transport
19. Karishma M., at al. Investigating Industry 4.0 Technologies in Logistics 4.0 Usage Towards Sustainable Manufacturing Supply Chain. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No. 10. Available at: https://www.researchgate.net/publication/380435630_Investigating_Industry_40_Technologies_in_Logistics_40_Usage_Towards_Sustainable_Manufacturing_Supply_Chain
20. Kunrath T. L., Dresch A., Veit D. R. Supply Chain Management and Industry 4.0: a Theoretical Approach. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 2022. Vol. 20 (1). P. 1263. Available at: https://www.researchgate.net/publication/364249699_Supply_chain_management_and_industry_40_a_theoretical_approach
21. Siddiqui A., Khan M., Rashid. Industry 4.0 Adoption in Transportation: Does Industry 4.0 Adoption Enhance Sustainability? A Systematic Literature Review. *International Journal of Supply and Operations Management*. 2024. Available at: https://www.researchgate.net/publication/378545597_Industry_40_Adoption_in_Transportation_Does_Industry_40_Adoption_Enhance_Sustainability_A_Systematic_Literature_Review

Научная статья
УДК 004.413
doi: 10.17586/2713-1874-2024-4-40-49

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ИТ-ПРОЕКТАМИ

Петр Вениаминович Горшков^{1✉}, Игорь Александрович Бессмертный²

^{1,2}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹АО «Универсальная трейдинговая платформа», Санкт-Петербург, Россия

¹vip@consultagency.ru[✉], <http://orcid.org/0009-0008-5173-7981>

²bessmertny@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6711-6399>

Язык статьи – русский

Аннотация: В условиях быстрого развития технологий и растущих требований к разработке программного обеспечения традиционные методологии управления проектами все чаще уступают место гибким и гибридным подходам. В статье анализируются современные методы управления ИТ-проектами и их влияние на успех, исходя из характеристик проекта, ключевых требований и особенностей команды. Рассмотрены сильные и слабые стороны традиционных, гибких и гибридных методологий. А также виды, для которых их использование будет наиболее приемлемо. Особое внимание уделено ограничениям при использовании той или иной методологии для возможности дальнейшей компенсации за счет объединения различных методов и подходов. Актуальность данного исследования обусловлена увеличивающимся разрывом между постоянно возрастающими требованиями к разработке программного обеспечения и ограниченными ресурсами и возможностями команд разработчиков. Во многих ситуациях причиной этого несоответствия является не отсутствие профессиональных навыков у программистов или их низкая квалификация, а недостаточно эффективная организации рабочих процессов внутри команд. В работе анализируются факторы, влияющие на выбор методологии, и даются рекомендации по их использованию для различных типов проектов.

Ключевые слова: методологии разработки программного обеспечения, программная инженерия, управление ИТ-проектами, Agile, DevOps, SCRUM

Ссылка для цитирования: Горшков П. В., Бессмертный И. А. Сравнение методов управления ИТ-проектами // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 4. С. 40–49. <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-40-49>.

COMPARISON OF IT PROJECT MANAGEMENT METHODS

Petr V. Gorshkov^{1✉}, Igor A. Bessmertny²

^{1,2}ITMO University, Saint Petersburg, Russia

¹JSC Universal Trading Platform, Saint Petersburg, Russia

¹vip@consultagency.ru[✉], <http://orcid.org/0009-0008-5173-7981>

²bessmertny@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6711-6399>

Article in Russian

Abstract: With the rapid development of technologies and growing demands on software development, traditional project management methodologies are increasingly giving way to agile and hybrid approaches. The article analyzes modern methods of IT project management and their impact on successful project implementation based on project characteristics, key requirements and team features. The strengths and weaknesses of traditional, agile and hybrid methodologies and project types are considered. Much attention is paid to methodology limitations and their compensation by combining different methods and approaches. The study is relevant due to the widening gap between the ever-increasing requirements for software development and the limited resources and capabilities of development teams. In many situations, the reasons for this discrepancy are not the lack of professional skills of programmers or their low qualifications, but the insufficiently effective organization of work processes within teams. The paper analyses the factors influencing the choice of methodology and in recommendations for their optimal use for various types of projects.

Keywords: Agile, DevOps, IT project management, SCRUM, software development methodologies, software engineering

For citation: Gorshkov P. V., Bessmertny I. A. Comparison of IT Project Management Methods. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 4. pp. 40–49. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-40-49>.

Введение. В последнее время наблюдается обострение конкуренции разработчиков программного обеспечения, которая вынуждает их резко сокращать сроки разработки в ущерб качеству с целью как можно быстрее выйти на рынок, постепенно устраняя недостатки, используя механизмы обратной связи с пользователями.

Таким образом, традиционные методологии управления проектами всё чаще уступают место гибким методологиям, но и они имеют свои ограничения. Для устранения недостатков гибких методологий всё больше команд разработчиков прибегают к использованию гибридных подходов, которые также имеют свои преимущества и недостатки.

Актуальность темы исследования обусловлена противоречием между требованием ускорения разработки программного обеспечения и ограниченными возможностями коллективов разработчиков. Во многих случаях этот разрыв связан не с недостаточной квалификацией программистов, а с низким уровнем организации процессов в команде. Таким образом, правильный выбор методологии управления и грамотная организация рабочего процесса являются одними из ключевых факторов успеха IT-проекта.

Постановка проблемы и цели исследования. Исследовательская проблема заключается в определении и сравнении современных методологий управления IT-проектами для понимания их применимости и ограничений. Гипотеза, выдвигаемая в рамках исследования, основывается на предположении, что грамотная комбинация методов из различных подходов может существенно сократить ограничения для большинства IT-проектов.

Целью исследования является систематизация знаний о современных методах управления IT-проектами, оценка их положительных и отрицательных сторон и разработка рекомендаций по их комбинации для сокращения ограничений. В рамках исследования решаются следующие задачи.

1) Анализ существующих методологий управления IT-проектами на основе публикаций.

2) Выявление факторов, влияющих на эффективность, и разработка рекомендаций

по комбинации методов для сокращения ограничений.

Литературный обзор. В настоящий момент существуют сотни подходов, которые состоят из традиционных и гибких методов и практик. Стоит отметить, что до сих пор остаются вопросы относительно того, что такое «Agile», и лишь немногие проекты придерживаются чистого «Agile», предпочитая собственные гибридные методы разработки [1]. Хотя многие компании используют какую-то конкретную методологию, преимущественно гибкую, более 50% проектов можно классифицировать как гибридные [2]. Среди традиционных методологий наиболее часто встречаются Waterfall, Spiral, V-model, Rational Unified Process (RUP), Incremental/Iterative, Synchronize and Stabilize, Rapid Prototyping, OpenUP (Open Unified Process), MSF (Microsoft Solutions Framework), PMBOK (Project Management Body of Knowledge) и PRINCE2 (Projects in Controlled Environments Version 2), каждая из которых имеет свои плюсы и минусы [3–5]. Если взять, например, V-model, существует большое количество вариаций, но они несовершенны, и их необходимо дорабатывать [6]. Среди гибких и гибридных методологий чаще всего используются Scrum, XP (Extreme Programming), Kanban, Crystal, FDD (Feature-Driven Development), DSDM (Dynamic Systems Development Method), TDD (Test-Driven Development), ASD (Adaptive Software Development), D3 (Design-Driven Development), Scrumban, AUP (Agile Unified Process), BDD (Behavior-Driven Development) и DevOps [4].

Хотя в последнее время наблюдается тренд на переход к гибким методологиям даже в компаниях, не связанных с разработкой [7], и гибкие методологии становятся общепризнанным стандартом [8], остаются случаи, когда традиционные методологии более эффективны, например:

- при невозможности разделения проекта на небольшие части;
- когда регулярные изменения или поэтапный подход невозможны с юридической, технической или экономической точки зрения;
- если операционные риски не позволяют использовать гибкий подход;

- при создании решения в области управления процессами или приложений реального времени и систем, критически важных для безопасности [9].

Более 70% организаций за основу выбирают гибкие методологии из-за сложностей при внесении изменений, исправлений и корректировок по мере развертывания проекта и его фаз традиционными методами [10].

Традиционные методы, наиболее популярные из которых представлены в таблице 1, являются наилучшими в стабильной среде, когда определённый результат должен быть представлен за фиксированный бюджет в обозначенные сроки [11] и предъявляются особые требования к безопасности, например ВПК, космическая отрасль и другие [12].

Таблица 1

Область применения и ограничения наиболее популярных традиционных методологий

Источник: составлена авторами на основе [3, 13, 14]

Методология	Область применения	Ограничения
Waterfall	Непродолжительные проекты с постоянными и четкими требованиями, стабильной технологией, подразумевающих высокий контроль качества	Ограниченная гибкость, недостаточное участие клиентов и отсутствие своевременной обратной связи, сложность изменения требований после начала разработки, позднее тестирование (высокий риск выявления ошибок на поздних стадиях), длительный цикл разработки из-за возможных задержек на отдельных этапах [13]
Spiral	Сложные проекты со средним и высоким уровнем риска, где требуется оценка затрат, возможны корректировки, неопределённые требования заказчика	Слишком тяжелое управление и необоснованные затраты для простых проектов, высокая зависимость от экспертной оценки, излишняя документация, сложности соблюдения бюджета и графика [3]
V-model	Небольшие и средние проекты с определенными спецификациями и доступом к необходимым технологиям	Высокие изначальные затраты (поскольку тестирование начинается с первого этапа), значительная доработка документации (благодаря изменению требований), отсутствие гибкости [3]
Rational Unified Process (RUP)	Крупные проекты с высокой сложностью и необходимостью в формальном управлении, стабильности и точной документации	Риск превышения бюджета и отклонения от графика (особенно при изменении требований), большое количество документации (усложняет проект и снижает гибкость), ограниченная коммуникация между участниками (приводит к изоляции команд) [14]

Традиционные методы подразумевают трудоёмкий процесс, включающий в себя составление плана проекта, подробное описание требований до начала разработки и

дальнейшее следование им на этапах проектирования, кодирования и тестирования, практически без возможности вносить изменения [15]. Также традиционные подходы

зачастую обречены на провал при реализации инновационных проектов, так как подробное предварительное планирование оказывает только негативное влияние, а недостаточная автономия и коммуникация не обеспечивают

необходимой для получения результата вовлечённости [16]. Всё это способствует переходу к более гибким методологиям, наиболее популярные из которых представлены в таблице 2.

Таблица 2

Область применения и ограничения наиболее популярных гибких методологии

Источник: составлена авторами на основе [17–19]

Методология	Область применения	Ограничения
SCRUM	Небольшие или средние команды, проекты с меняющимися требованиями и приоритетами, где важна гибкость и быстрая адаптация	В чистом виде не подходит для крупных или распределенных команд, слабая системная архитектура, отсутствие гибкости в спринтах, упор на планировании и выполнении спринтов, а не на качестве продукта, требуются опытные члены команды, недостаточно внимания уделяется инженерии и тестированию [17]
Extreme Programming (XP)	Малые проекты с низким уровнем риска, где требуется гибкость, нет необходимости в ведении документации и приветствуется быстрое реагирование на изменения в требованиях	Минимум документации и недостаточное внимание к архитектуре и дизайну ограничивают масштабируемость XP, делая его подходящим только для совсем небольших проектов [18]
Kanban	Проекты, где важно последовательное улучшение и управление рабочей нагрузкой, с акцентом на гибкость и адаптацию к существующим процессам	Сложно установить лимиты незавершенной работы, недостаточная визуализация процесса может усложнить мониторинг проекта, трудности с внедрением из-за привязанности сотрудников к привычным методам, перебои в процессе могут замедлить весь поток работы, требуя дополнительных усилий на восстановление [19]
Crystal	Небольшие, локальные команды с проектами, ограниченными по времени и ресурсам, если важна гибкость и адаптивность	Отсутствие системной верификации дизайна и кода, недостаточная документация и ограниченное описание практик, зависимость плана проекта от размера команды, а не от требований [17]
Feature-Driven Development (FDD)	Большие проекты, где важны качественное проектирование и независимость модулей, например, для проектов, требующих высококачественной модели	Не выполняется сбор и анализ требований, отсутствует управление изменениями и командная работа, системный дизайн и диаграммы считаются лишь рабочими документами, процесс зависит от главного разработчика (что ограничивает коллективное владение кодом) [17]

Методология	Область применения	Ограничения
Dynamic Systems Development Method (DSDM)	Небольшие проекты с четкими сроками и ресурсами, особенно если важны гибкость и строгое соблюдение сроков	Не подходит для жизненно важных проектов и управления большими командами, слабо поддерживает средние и сложные проекты, неэффективен для научных и инженерных проектов [17]
Test-Driven Development (TDD)	Проекты с частыми изменениями кода, где важно поддержание высокого качества через автоматическое тестирование и улучшение архитектуры	Требуются навыки тестирования у разработчиков, плохо подходит для проектов с высокими зависимостями, мало документации, трудности при множественных ошибках тестов [17]

Хотя SCRUM является наиболее распространённой методологией [15, 20, 21], разработчики зачастую не верят, что организация соблюдает принципы и ценности SCRUM [22]. Всё больше команд выбирают бережливые подходы [23], ставя под сомнение эффективность ежедневных стендап-встреч, использование пользовательских историй вместо технического задания и других артефактов [21]. Даже приверженцы SCRUM говорят о необходимости использования дополнительных инструментов [24].

При прочих равных условиях использование SCRUM по сравнению с Kanban может позволить увеличить прибыль на 8,5% и сократить расходы на 15,3% [25]. Но SCRUM лучше применять только тогда, когда команды прошли квалификацию. При использовании SCRUM есть более высокий риск недооценки сроков и бюджета. Поэтому выбор должен осуществляться исходя из условий работы и срочности, частоты изменения требований и неопределённости в будущем, размера и сложности, и уровня зрелости команды [26].

DevOps – подход, объединяющий группы разработчиков и эксплуатации для обеспечения непрерывной разработки, который еще не доведён до необходимого уровня [27]. Он действительно сокращает сроки, повышает производительность, позволяет управлять быстрыми циклами [28]. Однако есть большое количество факторов, влияющих на

успех, новые роли и обязанности, наличие рисков [29, 30]. В сочетании с Agile, например, расширение BizDevOps, нацелено на внедрение гибкости в классическую архитектуру [31]. Позволяет увеличить частоту релизов, но требует более широкий набор разносторонних навыков и зависит от уровня зрелости [32]. Внедрение может быть затруднено из-за недостатка структурированных руководств [33].

При всей популярности гибких методологий, каждый подход имеет массу ограничений, связанных с заинтересованными сторонами и командой, подходом к процессу и планированию, проектной работой, доставкой и изменениями [34]. Немаловажным фактором является зрелость команды [35] и наличие организационных навыков у всех членов команды [36]. Даже авторы Agile манифеста признают, что Agile стал сложнее и его необходимо перезагрузить, часто встречается фальшивая гибкость, и переход на Agile не приносит заложенных в него преимуществ [37]. Именно поэтому в последнее время всё больше фокус внимания направляется на гибридные методологии.

Гибридные методологии. Наиболее часто встречается объединение традиционных или гибких подходов с методологией SCRUM.

Объединение Waterfall и SCRUM позволяет уменьшить ограничения каждого из подходов [38]. Фазы инициирования и

планирования реализуются с использованием Waterfall, а сама деятельность осуществляется с помощью SCRUM или Kanban [39]. Объединение традиционных и гибких методологий обеспечивает расширение прав и возможностей членов команды, что дает им чувство причастности и повышает мотивацию [40].

Объединение SCRUM и RUP улучшает адаптивность проектов к изменениям, сохраняя преимущества традиционных методов. Однако при этом остаётся сложность интеграции гибких подходов в крупные организации, привыкших к жестким регламентам, и необходима дополнительная подготовка команд [41].

Scrumban – ещё одна популярная гибридная методология, в которой основа берётся из SCRUM, а доска заимствуется из Kanban [42].

Использование гибридных методологий требует наличия высокой квалификации руководителей проектов, так как отсутствие должного опыта может привести к ухудшению результатов. Вместо того, чтобы убрать ограничения одного метода, будут наложены ограничения нескольких методов [43], например, при использовании гибридного подхода, объединяющего UCD / User-centered design, Lean Startup и XP [44] вместо преимуществ могут появиться новые ограничения.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели и решения задач были использованы различные методы сбора и обработки информации. В основе исследования лежит систематический анализ литературы по методологиям управления IT-проектами.

По информации, содержащейся в открытых источниках, был составлен список общепризнанных авторов, внёсших наибольший вклад в развитие программной инженерии. После чего был произведён поиск их свежих публикаций в базах данных Scopus, Web of Science и Google Scholar.

Следующим шагом было составление набора ключевых слов и запросов, на основе которых производился поиск. При поиске особое внимание уделялось компетентности авторов, авторитетности издания и содержанию самой статьи.

При проведении исследования использовались сравнительный анализ для определения сильных и слабых сторон различных

подходов и определения области их применения и систематический анализ для обобщения и классификации полученных данных.

Для статистической оценки были использованы данные о применении различных подходов в проектах, отличающихся масштабом, уровнем сложности и критически значимыми факторами. Для структурирования и формулировки выводов использовались методы анализа и синтеза.

Результаты исследования. На основе анализа выбранных источников были выявлены особенности применения различных методологий.

Гибкие методологии лучше использовать при работе небольшими командами, когда контроль качества не является критически важным и есть большая вероятность внесения изменений после начала проекта. В большинстве случаев рекомендуется использовать не отдельно взятую методологию, а сочетать Scrum в качестве основы и Kanban доску для визуализации. Для небольших проектов в рамках спринта можно добавить парное программирование из XP. Если команда распределенная или часть задач выполняется дистанционно, стоит использовать онлайн инструменты для синхронизации работы, в первую очередь, это относится к Kanban доске.

Традиционные методологии больше подходят для крупных проектов, в которых критически важно обеспечение контроля качества и есть возможность принудительно ограничивать число вносимых изменений. Тем не менее, здесь целесообразно добавлять элементы гибкости, промежуточные итерации с обратной связью. Это позволит минимизировать риск поздней обратной связи и необходимости переделывать весь проект. Даже совсем небольшие проекты, вероятность расширения которых близка к нулю, хотя это сейчас может быть не популярно, рекомендуется реализовывать с помощью Waterfall и использовать монолитную архитектуру.

Гибридные методологии, особенно при объединении традиционных и гибких методов, позволяют обеспечить баланс между строгостью и гибкостью и могут быть адаптированы под самые разные проекты. Рекомендуется начать с Waterfall для четкого планирования и составления документации, а

непосредственно разработку осуществлять, опираясь на рекомендации по использованию гибких методологий. Добавление практики DevOps тоже имеет место быть, но только при условии достаточной зрелости команды.

Исследование подтверждает, что проблемы часто связаны не столько с уровнем компетенции разработчиков, сколько с низким уровнем организации процессов в команде. Анализ ключевых факторов подтвердил, что распределение ролей, обратная связь и наличие структурированных процессов являются определяющими условиями для успешной реализации IT-проектов.

Результаты исследования имеют практическую значимость для менеджеров проектов, предоставляя краткую информацию по области применения и ограничениям наиболее популярных методологий.

Неправильный выбор подхода к проектированию может привести не только к низкому качеству, но и к полному провалу проекта. В качестве наиболее характерного примера такого провала можно привести проект модернизации инфраструктуры информационных технологий ФБР США «Виртуальное досье» (Virtual Case File), который обошелся бюджету США в сумму \$ 170 млн и был закрыт. Причины провала – нарушение принципов разработки программного обеспечения [45]. Еще несколько примеров, таких как провал ресурса Healthcare.gov или миссии NASA Mars Climate Orbiter, свидетельствуют о том, что практически неограниченные бюджеты, ресурсы, возможность использовать лучших разработчиков не имеют значения, если неправильно выстроено управление.

Выводы и рекомендации. На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что наличие множества самых различных технологий разработки программного обеспечения свидетельствует об отсутствии универсальной методологии. Выбирать методологию следует исходя из специфики и характеристик проекта и команды разработчиков. При наличии должного уровня компетентности можно комбинировать методы и использовать гибридные подходы для компенсации ограничений отдельно взятой методологии. Тем не менее, на данный момент не существует общеизвестной комбинации методов, которая бы позволила избавиться от

большинства ограничений и была бы применима при различных спецификах и характеристиках проекта и команды разработчиков.

Перед стартом проекта необходимо оценить зрелость команды и опыт работы с выбранной методологией. При недостатке опыта стоит внедрить фреймворки поддержки. Экспериментировать с объединением подходов и использовать гибридный подход стоит только после обучения команды.

При выборе методологии стоит обратить внимание и на не самые очевидные моменты.

1) Scrum пропагандирует гибкость, является самой популярной Agile методологией, но её гибкость не следует понимать буквально. Строгая привязка к артефактам и спринтам может затруднить адаптацию под реальные потребности команды.

2) Традиционный Waterfall – это не абсолютно «вчерашний день». Несмотря на свою репутацию устаревшего метода, Waterfall остаётся стандартом для проектов с фиксированными требованиями, например в космической отрасли или ВПК.

3) Гибридные подходы не решают за вас все проблемы. При отсутствии опыта внедрение гибридных моделей может усугубить существующие ограничения, вместо того чтобы компенсировать их.

Отдельная рекомендация касается владельцев бизнеса. В условиях ограниченного бюджета может возникнуть желание сэкономить на дорогостоящей позиции руководителя проекта и самостоятельно управлять разработкой. Скорее всего, если нет должной компетенции, это приведёт к провалу. Лучше использовать меньше программистов, но поставить квалифицированного менеджера проекта. Хороший менеджер принесёт больше ценности, чем несколько разработчиков.

В дальнейшем планируется изучение отдельно взятых методов в рамках большинства общеизвестных методологий для определения их совместимости и комбинации методов. Основной целью дальнейших исследований является минимизация ограничений и применимость в большинстве проектов для обеспечения должного качества и скорости разработки без увеличения бюд-

жета и необходимости выбирать между сотней методологий или самостоятельной

комбинацией методов в рамках гибридного подхода.

Список источников

1. Kuhrmann M. et al. What Makes Agile Software Development Agile? *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2021. Vol. 48. No. 9. pp. 3523–3539. (In Eng.). DOI: 10.1109/TSE.2021.3099532.
2. Andrew G., Blaize R., Pedro S. Agile, Traditional, and Hybrid Approaches to Project Success: Is Hybrid a Poor Second Choice? *Project Management Journal*. 2020. No. 52 (1). (In Eng.). DOI: 10.1177/8756972820973082.
3. Akinsola J.E.T., Ogunbanwo A.S., Okesola O.J., Odun-Ayo I.J., Ayegbusi F.D., Adebisi A.A. Comparative Analysis of Software Development Life Cycle Models (SDLC). *Silhavy, R. (eds) Intelligent Algorithms in Software Engineering. CSOC 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham*. 2020. Vol. 1224. pp. 310–322. (In Eng.). DOI: 10.1007/978-3-030-51965-0_27.
4. Necmettin O., Busra O.K., Mehmet G. Towards a Better Understanding of Agile Mindset by Using Principles of Agile Methods. *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2020. Vol. 21. pp. 721–730. (In Eng.). DOI: 10.15439/2020F46.
5. Lecomber A. Value of Teaching PRINCE2 Project Management Methodology. *Tatnall A. (eds) Encyclopedia of Education and Information Technologies. Springer, Cham*. 2020. pp. 1758–1761. (In Eng.). DOI: 10.1007/978-3-030-10576-1_199.
6. Graessler I., Hentze J. The new V-Model of VDI 2206 and its validation. *Automatisierungstechnik*. 2020. Vol. 68 (5). pp. 312–324. (In Eng.). DOI: 10.1515/auto-2020-0015.
7. Patrucco A. S., Canterino F., Minelgaite I., How do Scrum Methodologies Influence the Team's Cultural Values? A Multiple Case Study on Agile Teams in Nonsoftware Industries. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2022. Vol. 1. No. 69 (6). pp. 1–11. (In Eng.). DOI: 10.1109/TEM.2022.3146717.
8. Saravanas A., Curinga M. Simulating the Software Development Lifecycle: The Waterfall Model. *Applied System Innovation*. 2023. Vol. 6 (6). P. 108. (In Eng.). DOI: 10.3390/asi6060108.
9. Theo Thesing T., Feldmann C., Burchardt M. Agile versus Waterfall Project Management: Decision Model for Selecting the Appropriate Approach to a Project. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 181. pp. 746–756. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.227.
10. Saeedi K., Visvizi A. Software Development Methodologies, HEIs, and the Digital Economy. *Education Sciences*. 2021. Vol. 11 (2). No. 73. 21 p. (In Eng.). DOI: 10.3390/educsci11020073.
24. Jacobson I., Sutherland J., Kerr B., Buhnova B. Better Scrum through Essence. *Software: Practice and Experience*. 2022. Vol. 52. No. 6. pp. 1531–1540. (In Eng.). DOI: 10.1002/spe.3070.
25. Orlov E. V., Rogulenko T. M., Smolyakov O. M., Oshovskaya N. V., Zvorykina T. I., Rostanets V. G., Dyundik E. P. Comparative Analysis of the Use of Kanban and Scrum Methodologies in IT Projects. *Universal Journal of Accounting and Finance*. 2021. Vol. 9. No. 4. pp. 693–700. (In Eng.). DOI: 10.13189/ujaf.2021.090415.
26. Zayat W., Senvar, O. Framework Study for Agile Software Development Via Scrum and Kanban. *International Journal of Innovation and Technology Management*. 2020. Vol. 17. No. 4. (In Eng.). DOI: 10.1142/S0219877020300025.
27. Jayakody J. A. V. M. K., Wijayanayake J. Challenges for Adopting DevOps in Information Technology Projects. *2021 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), Colombo, Sri Lanka*. 2021. pp. 203–210. (In Eng.). DOI: 10.1109/SCSE53661.2021.9568348.
28. Angara J., Prasad S., Gutta S. DevOps Project Management Tools for Sprint Planning, Estimation and Execution Maturity. *Cybernetics and Information Technologies*. 2020. Vol. 20. No. 2. pp. 79–92. (In Eng.). DOI: 10.2478/cait-2020-0018.
29. Akbar M. A., Khan A. A., Islam N., Mahmood S. DevOps Project Management Success Factors: A Decision-Making Framework. *Softw: Pract Exper*. 2024. Vol. 54. No. 2. pp. 257–280. (In Eng.). DOI: 10.1002/spe.3269.
30. Azad N., Hyrynsalmi S. Mäntymäki M. Understanding DevOps Critical Success Factors: Insights from Professionals. *New Sustainable Horizons in Artificial Intelligence and Digital Solutions*. 2023. pp. 78–90. (In Eng.). DOI: 10.1007/978-3-031-50040-4_7.
31. Fuentes-Quijada G., Ruiz-González F., Caro A. Challenges as Regards Aligning IT and Business with Agility when Applying the BizDevOps Approach. *Enterprise Information Systems, 25th International Conference, ICEIS 2023*. 2023. pp. 201–219. (In Eng.). DOI: 10.1007/978-3-031-64755-0_10.
32. Aymeric H., Barbara L., Frantz R., Brian F. From Agile to DevOps: Smart Skills and Collaborations. *Information Systems Frontiers*. 2020. Vol. 22. No. 3. pp. 927–945. (In Eng.). DOI: 10.1007/s10796-019-09905-1.
33. Almeida F., Simões J., Lopes S. Exploring the Benefits of Combining DevOps and Agile. *Future Internet*. 2022. Vol. 14 (2). No. 63. (In Eng.). DOI: 10.3390/fi14020063.

11. Ciric Lalic D., Lalic B., Delić M., Gracanin D., Stefanovic D. How Project Management Approach Impact Project Success? From Traditional to Agile. *International Journal of Managing Projects in Business*. 2022. Vol. 15 (3). pp. 494–521. (In Eng.). DOI: 10.1108/IJMPB-04-2021-0108.
12. Islam A. K. M., Ferworn A. A Comparison between Agile and Traditional Software Development Methodologies. *Global Journal of Computer Science and Technology*. 2020. Vol. 20 (2). pp. 7–42. (In Eng.). DOI: 10.34257/GJCSTCVOL20IS2PG7.
13. Pargaonkar S. A Comprehensive Research Analysis of Software Development Life Cycle (SDLC) Agile & Waterfall Model Advantages, Disadvantages, and Application Suitability in Software Quality Engineering. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2023. Vol. 13 (8). pp. 120–124. (In Eng.). DOI: 10.29322/IJSRP.13.08.2023.p14015.
14. Shafiee S., Wautelet Y., Hvam L., Sandrin E., Forza C. Scrum Versus Rational Unified Process in Facing the Main Challenges of Product Configuration Systems Development. *Journal of Systems and Software*. 2020. Vol. 170. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.jss.2020.110732.
15. Alsaqqa S., Sawalha S., Abdel-Nabi H. Agile Software Development: Methodologies and Trends. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2020. Vol. 14 (11). pp. 246–270. (In Eng.). DOI: 10.3991/ijim.v14i11.13269.
16. Malik M., Sarwar S., Orr S. Agile Practices and Performance: Examining the Role of Psychological Empowerment. *International Journal of Project Management*. 2021. Vol. 39 (1). pp. 10–20. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.ijproman.2020.09.002.
17. Ibrahim M., Aftab S., Bakhtawar B., Ahmad M., Iqbal A., Aziz N., Javeid M., Ihnaini B. Exploring the Agile Family: A Survey. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2020. Vol. 20 (10). pp. 163–179. (In Eng.). DOI: 10.22937/IJCSNS.2020.20.10.22.
18. Muhammad I., Shabib A., Munir A., Ahmed I., Bilal S.K., Muhammad I., Baha N.S.I., Nouh S.E. Presenting and Evaluating Scaled Extreme Programming Process Model. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020. Vol. 11 (11). pp. 163–171. (In Eng.). DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0111121.
19. Hamzah A., Mazni O., Rohaida R. The State of the Art of Agile Kanban Method: Challenges and Opportunities. *Independent Journal of Management & Production*. 2021. Vol. 12 (8). pp. 2535–2550. (In Eng.). DOI: 10.14807/ijmp.v12i8.1482.
20. Sutherland J., Jacobson, I., Kerr B. Scrum Essentials Cards. *Queue*. 2020. Vol. 18. No. 3. pp. 83–106. (In Eng.). DOI: 10.1145/3411757.3418775.
21. Putri P., Raharjo T., Hardian B., Simanungkalit T. Challenges and Best Practices Solution of Agile Project Management in Public Sector: A Systematic Literature Review. *JOIV International Journal on Informatics Visualization*. 2023. Vol 7 (2). pp. 606–614. (In Eng.). DOI: 10.30630/joiv.7.2.1098.
22. Fernando L., Paula M., Vanessa B.B., Graciano, Paola G., Guilherme T. Does Maturity Level Influence the Use of Agile UX Methods by Digital Startups? Evaluating Design Thinking, Lean Startup, and Lean User Experience. *Information and Software Technology*. 2023. Vol. 154. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.infsof.2022.107107.
23. Venkatesh V., Thong J.Y.L., Chan F. K. Y., Hoehle H., Spohrer K. How Agile Software Development Methods Reduce Work Exhaustion: Insights on Role Perceptions and Organizational skills. *Info Systems J*. 2020. Vol. 30 (4). pp. 733–761. (In Eng.). DOI: 10.1111/isj.12282.
24. Cockburn A., Kerievsky J., Hunt A. Rebooting Agile. *Cutter Business Technology Journal*. 2019. Vol. 32 (3). pp. 6–12. (In Eng.).
25. Yahya N., Maidin S. The Waterfall Model with Agile Scrum as the Hybrid Agile Model for the Software Engineering Team. *10th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*. 2022. pp. 1–5. (In Eng.). DOI: 10.1109/CITSM56380.2022.9936036.
26. Făgărășan C., Popa O., Pisla A., Cristea C. Agile, Waterfall and Iterative Approach in Information Technology Projects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1169 (012025). (In Eng.). DOI: 10.1088/1757-899X/1169/1/012025.
27. Žužek T., Kušar J., Rihar L., Berlec T. Agile-Concurrent Hybrid: A Framework for Concurrent Product Development Using Scrum. *Concurrent Engineering: Research and Applications*. 2020. Vol. 28 (1). pp. 1–10. (In Eng.). DOI: 10.1177/1063293X20958541.
28. Chandra P., Reddy S., Reddy P.C., Nachiyappan S., Ramakrishna V., Senthil R., Anwer S., Rk K. Hybrid Model Using Scrum Methodology for Software Development System. *Journal of Nuclear Energy Science & Power Generation Technology*. 2021. Vol. 10 (9). pp. 1–6. (In Eng.).
29. Fuentes-Del-Burgo J., Sebastián M. Comparative Analysis of the Board Tool in the Agile Methodologies Scrum, Kanban and Scrumban in Software Projects. *26th International Congress on Project Management and Engineering, Terrassa, Spain*. 2022. pp. 1660–1671. (In Eng.).
30. Gunawan F., Budiardjo E.K. A Quest of Software Process Improvements in DevOps and Kanban: A Case Study in Small Software Company. *In Proceedings of the 2021 4th International Conference on Software Engineering and Information Management*

21. Morandini M., Coleti T.A., Oliveira E., Corrêa P.L.P. Considerations About the Efficiency and Sufficiency of the Utilization of the Scrum Methodology: A Survey for Analyzing Results for Development Teams. *Computer Science Review*. 2021. Vol. 39. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.cosrev.2020.100314.
22. Grebic B., Stojanović A. Application of the Scrum Framework on Projects in IT Sector. *European Project Management Journal*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 37–46. (In Eng.). DOI: 10.18485/epmj.2021.11.2.4.
23. Hassanein E. E., Hassanien S. A. Cost Efficient Scrum Process Methodology to Improve Agile Software Development. *International Journal of Computer Science and Information Security*. 2020. Vol. 18. No. 4. pp. 123–131.
- (*ICSIM '21*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2021. pp. 39–45. (In Eng.). DOI: 10.1145/3451471.3451478.
44. Zorzetti M., Signoretti I., Salerno L., Marczak S., Bastos R. Improving Agile Software Development using User-Centered Design and Lean Startup. *Information and Software Technology*. 2022. Vol. 121. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.infsof.2021.106718.
45. Goldstain H. Who Killed the Virtual Case File? How the FBI Blew More than \$100 Million on Case-Management Software it Will Never Use. *IEEE Spectrum*. Sept., 01, 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spectrum.ieee.org/who-killed-the-virtual-case-file> (In Eng.).

Научная статья
УДК 004.89
MSC 94-10
doi: 10.17586/2713-1874-2024-4-50-59

ОБЪЯСНИМОСТЬ ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

*Артём Олегович Исаков¹, Наталия Федоровна Гусарова²,
Дмитрий Александрович Добренко³, Александр Андреевич Голубев⁴*

^{1,2,3,4}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
¹aoisakov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2938-0575>
²nfngusarova@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1361-6037>
³enotpalaskun@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1485-1166>
⁴9459539@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7417-6947>
Язык статьи – русский

Аннотация: В статье рассматривается задача улучшения объяснимости поведения агентов в системах поддержки клинических решений с использованием многоагентного обучения с подкреплением, учитывая поведенческие особенности отдельных агентов. Особое внимание уделяется применению алгоритма проксимальной оптимизации политики (PPO), который используется для моделирования взаимодействия агентов искусственного и естественного интеллекта. Кроме того, рассматривается важность учета поведенческих особенностей пациентов, что достигается через использование разработанного фреймворка «убеждения-желания-намерения» (BDI). Фреймворк позволяет моделировать поведение пациентов более точно, учитывая их индивидуальные предпочтения и потребности, что способствует улучшению качества медицинского обслуживания. Для повышения объяснимости поведения агентов и обеспечения прозрачности принимаемых решений предложено использование большой языковой модели (LLM). Для оценки качества фреймворка как средства обеспечения требований ХАИ (объяснимого искусственного интеллекта) разработан набор критериев, продемонстрирована его репрезентативность. Оценка проводилась путем сравнения объяснений, сформированных четырьмя популярными языковыми моделями по семи запускам игрового процесса с различными исходными данными. Предложенный подход к обеспечению объяснимости в многоагентных симуляциях открывает возможности для дальнейшего развития и внедрения таких систем в клиническую практику.

Ключевые слова: многоагентные системы, обучение с подкреплением, объяснимость, принятие решений, системы реального времени, составление расписаний

Ссылка для цитирования: Исаков А. О., Гусарова Н. Ф., Добренко Д. А., Голубев А. А. Объяснимость поведения агентов в системах поддержки принятия клинических решений // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 4. С. 50–59. <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-50-59>.

EXPLAINABILITY OF AGENT BEHAVIOR IN CLINICAL DECISION SUPPORT SYSTEMS

Artem O. Isakov¹, Natalia F. Gusarova², Dmitry A. Dobrenko³, Aleksandr A. Golubev⁴

^{1,2,3,4}ITMO University, Saint Petersburg, Russia
¹aoisakov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2938-0575>
²nfngusarova@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1361-6037>
³enotpalaskun@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1485-1166>
⁴9459539@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7417-6947>
Article in Russian

Abstract: The article considers the task of improving the explainability of agent behavior in clinical decision support systems using multi-agent reinforcement learning, taking into account the behavioral characteristics of individual agents. Special attention is paid to the application of the proximal policy optimization (PPO) algorithm, which is used to simulate the interaction of artificial and natural intelligence agents. In addition, the importance of taking into account the behavioral characteristics of patients is considered, which is achieved through the use of the developed framework «beliefs-desires-intentions» (BDI). The framework allows you to model patient behavior more accurately, taking into account their individual preferences and needs, which contributes to improving the quality of medical care. To increase the explainability

of agent behavior and ensure transparency of decisions, the use of a large language model (LLM) is proposed. To assess the quality of the framework as a means of ensuring the requirements of XAI (explicable artificial intelligence), a set of criteria has been developed and its representativeness has been demonstrated. The assessment was carried out by comparing the explanations generated by four popular language models for seven gameplay launches with different initial data. The proposed approach to ensuring explainability in multi-agent simulations opens up opportunities for further development and implementation of such systems in clinical practice.

Keywords: decision making, explainability, multi-agent systems, real time systems, reinforcement learning, scheduling

For citation: Isakov A. O., Gusarova N. F., Dobrenko D. A., Golubev A. A. Explainability of Agent Behavior in Clinical Decision Support Systems. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 4. pp. 50–59. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-50-59>.

Введение. Постановка задачи. Системы поддержки принятия клинических решений (СПКР) широко внедряются в практику работы учреждений здравоохранения. Спектр их задач включает помощь врачам в постановке диагноза, организацию общения в системе «врач – пациент», контроль выполнения клинических протоколов, а также комплексное планирование деятельности медицинской организации на всех уровнях. Особенно остро вопрос разработки СПКР стоит для клиник высокотехнологичной медицинской помощи, где сосредоточены высококвалифицированные кадры и дорогостоящее оборудование. Здесь большое значение приобретает распределение свободных операционных в целях максимально эффективного использования ресурсов клиник при увеличении входящего потока пациентов.

Оптимизация использования ресурсов в клинической практике и, в частности, оптимизация использования операционных (operation rooms) является востребованной задачей в рамках создания СПКР [1]. Известны различные подходы к ее решению, в том числе подходы на основе теории расписаний с очередями и аналогичные, а также подходы на основе искусственного интеллекта (см., например, [2–6]). Однако следует подчеркнуть, что предметом рассмотрения в настоящей статье является не создание таких СПКР и не организация их сравнения, а разработка методики объяснимости их решений для конечного пользователя, что отражено и в названии статьи.

Актуальность темы статьи непосредственно вытекает из требования обеспечения доверия к системам искусственного интеллекта (ИИ), заявленного в [7], а также в многочисленных зарубежных источниках (например, [8]). Из набора характеристик,

составляющих доверительный ИИ, в настоящей статье авторы обратились к объяснимости (интерпретируемости) систем ИИ [9, 10], отсутствие которой, как показала практика последних лет, остается «камнем преткновения» для внедрения систем ИИ и, в частности, СПКР на их основе, в реальную практику работы медицинских учреждений.

В качестве **объекта рассмотрения** в статье выбрана СПКР, построенная на основе ИИ, а именно на основе многоагентного обучения с подкреплением, что соответствует передовым тенденциям в идеологии СППР в целом.

Преимуществами такого решения для СПКР являются возможность обработки нестационарности, большая гибкость в учете особенностей пациентов, возможность текущей корректировки решений на основе обратной связи. СПКР использует многоагентный симуляционный подход, в рамках которого каждому агенту естественного интеллекта (ЕИ) ставится в соответствие агент искусственного интеллекта (ИИ) с некоторым набором внутренних параметров, унаследованных от агента ЕИ. Агенты вступают между собой в игровое взаимодействие, организуемое на основе алгоритма проксимальной оптимизации политики (Proximal Policy Optimization, PPO) [11], который принадлежит к классу алгоритмов обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) [12]. Каждый агент преследует свои локальные цели, однако, помимо этого, все агенты стремятся к некоторой общей глобальной цели, в нашем случае – к снижению среднего времени обслуживания. При этом открывается возможность оценить реакцию на возникновение эмерджентного события, в данном случае – такого агента, который отказывается идти на компромиссы и занимает чисто

кооперативную (альтруист) или чисто состязательную (эгоцентрик) позицию.

Специфику построения СПКР рассматриваемого типа определяют два фактора. Во-первых, в период ожидания состояние пациента может ухудшиться, и в этом случае он будет нуждаться в оказании медицинской помощи в первую очередь/вне очереди, вплоть до проведения оперативного вмешательства по экстренным показаниям. Это может вызвать недовольство других пациентов, уже внесенных в расписание. Во-вторых, пациенты, ожидающие своей очереди на оказание медицинской помощи и лечение в клинике, могут, в силу личных/различных обстоятельств, изменять время/сроки проведения манипуляции/операции и т.п., что также может негативно сказаться на других пациентах.

Таким образом, при описании интеллектуальных агентов, репрезентирующих пациентов, необходимо учитывать их поведенческие особенности. С этой целью в рассматриваемой СПКР использован когнитивный фреймворк «убеждения–желания–намерения» (Belief–Desire–Intention, BDI) [13]. Убеждения интеллектуального агента отражают его представления о себе и внешней по отношению к нему среде, включая других агентов. Представления агента не обязательно являются правдой и могут измениться. Желания – это представления агента о состоянии внешней среды, к которому он стремится. Намерения – это активные решения агента, приближающие его к желаемому состоянию внешней среды.

В ходе проектирования игры параметры фреймворка BDI были включены в модель построения суждений агента и принятую систему ролей. Для управления процессом игры крайне желательно отслеживать в явном виде, в какой форме и в какой мере конкретный агент следует схеме BDI. Однако такое отслеживание представляет трудности для менеджера клиники, так как информация о процессе игры записывается только в лог игры.

Методы исследования. В настоящей работе рассматривается проблема повышения объяснимости поведения агентов в СПКР, построенной на основе многоагентного симуляционного подхода. В качестве средства ее решения предлагается использовать большую языковую модель (Large Linguistic Model,

LLM). Разработана методика ее применения в составе системы объяснимого ИИ на основе промптов, проведено сравнение результатов ее применения на разных типах LLM, которое подтвердило эффективность методики.

Анализ способов реализации объяснимости поведения агентов в СПКР (обзор литературы). Объяснимость искусственного интеллекта (eXplainability of Artificial Intelligence, XAI) – важный аспект доверия к системам искусственного интеллекта, которое, в свою очередь, является одним важнейших потребительских свойств и лимитируется законодательно [7]. Объяснимость систем ИИ и их компонентов является важным аспектом в развитии доверия. Пользователю системы важно понимать, как система ИИ принимает решения и какие ее компоненты были наиболее сильно задействованы в каждом отдельном акте процесса принятия решения.

Рассматривая СПКР как многоагентную систему, можно выделить в качестве наиболее близких подходов работы [14–16]. В работе [14] авторы рассматривают архитектуру программного обеспечения для разработки приложений Web.3, интегрирующих интеллектуальные MAC, работающие через децентрализованную автономную организацию путем формирования консенсуса на основе блокчейна. В качестве механизма объяснимости авторы используют широковебательную передачу информации от отдельного агента всем заинтересованным агентам и технологию публикации-подписки в реальном времени. Специфика поведения отдельных агентов, в том числе BDI-свойства, в таком подходе принципиально не учитывается.

В работе [15] в качестве подхода к объяснимости предлагается использовать язык i^* в качестве языка моделирования для графического представления действий агентов. Модель i^* представляет собой граф, вершинами которого являются элементы различных видов, таких как цели, задачи, ресурсы, а ребра задают отношения различных видов между элементами. Такая модель представляется эффективной для целей планирования коммуникации большого числа агентов в контексте интернета вещей (Internet of Things), но не для целей оперативного отслеживания поведения агентов в СПКР.

В работе [16] подчеркивается необходимость объяснимости поведения агентов МАС в реальном времени и предлагается использовать для этого фреймворк Real-Time Beliefs Desires Intentions (RT-BDI). Однако указанный фреймворк описан в работе только на концептуальном уровне, более того, явно выделены проблемы его программной реализации существующими средствами, в частности, с помощью JASON-подобных технологий.

Переходя к реализации ХАИ в системах, реализующих концепцию RL, следует выделить обзорные работы [17, 18], которые рассматривают не только классификацию подходов, но что особенно важно, классификацию метрик для измерения уровня ХАИ. В работе [18] предложена следующая классификация:

1) Точность (Fidelity) предполагает сравнение между решением, предлагаемым моделью с ХАИ, и неинтерпретируемой моделью.

2) Производительность (Performance) является стандартной метрикой для любой задачи и показывает, насколько есть уверенность в том, что модель будет работать ожидаемым образом при развертывании в целевой среде.

3) Понятность (Comprehensibility) относится к способности целевой аудитории понимать объяснение. Разработка тестов для оценки этой способности требует тщательного рассмотрения и интерпретации неопределенного термина «понимание». Оценка этого показателя может включать в себя отчет экспертов.

4) Предпочтительность (Preferability) может быть выражена в явной или неявной (скрытой) форме. Она является одним из важнейших показателей, так как более предпочтительные объяснения в идеале должны иметь высокую положительную корреляцию с их интегральной полезностью для пользователя при решении целевой задачи.

5) Действенность (Actionability) соотносится с тем, позволяют ли объяснения пользователям предпринимать осмысленные действия на основе их понимания объяснения.

6) Когнитивная нагрузка (Cognitive Load) отражает уровень когнитивных ресурсов, которые необходимо затратить пользователю для восприятия и реализации предлагаемого объяснения.

7) Визуализация (Visualizations) рассматривается авторами статьи как псевдометрика. Она обычно используется вместо количественной метрики для изучения интерпретируемости метода объяснения. Важно, что визуализации не обязательно должны быть изображениями: они могут включать описания на естественном языке, логические формулы и многое другое.

Обзор [17] отмечает сложность задачи формирования объяснимости в игровых моделях и считает, что здесь требуется объяснять не только действия игрока, но и его политику в целом. Поведенческие особенности игрока авторы обзора не выделяют как самостоятельный фактор. Говоря о классификации метрик объяснимости, авторы [17] выделяют ряд усложняющих факторов, таких как разнообразие трактовок объяснимости в целом и у различных типов аудитории, и в целом полагаются только на экспертные оценки, разделяя их на три уровня: уровень приложений, уровень человека и уровень функциональности [19].

В обзоре [20] предложена целевая классификация исследований в области ХАИ: объяснение сотрудничества агентов; визуализация; обобщение политики; объяснения на основе запросов; валидация. Сильной стороной обзора применительно к проблематике настоящей работы является фреймворк для составления запросов, направленных на объяснение поведения агентов. Фреймворк включает не только собственно формулировку запроса, но и задание релевантных ему состояний и их атрибутов, а также формирование ответа на запрос на естественном языке (хотя и из имеющегося набора предикатов, что затрудняет понимание ответа конечным пользователем).

Широкое внедрение LLM [21, 22] в практику разработки интеллектуальных систем дало новый импульс в области МАС: LLM предлагается использовать не только как самостоятельных агентов МАС [23], но и как средство объяснимости поведения других агентов [24, 25].

В работе [24] каждому автономному агенту придается своя LLM, которая создает текстовое описание хода игры; очевидно, что эти тексты во многом различаются. Для формирования единого объяснения предлагается проверять каждый такой текст единым сред-

ством ХАИ (типа Shap, LIME и др.), генерирующим набор соответствующих лемм. Множество таких наборов лемм вместе с предсказаниями LLM подается в алгоритм CART. Результатом работы CART является логическая структура лемм, имитирующая объяснение «обобщенной» LLM.

В работе [25] для объяснения поведения агента предлагается трехшаговая процедура. На первом шаге политика агента преобразуется в дерево решений.

На втором шаге из дерева решений извлекается путь решения для заданного состояния, который служит локальным представлением поведения агента. На третьем шаге он преобразуется в текстовое представление и подается в предварительно обученную LLM, которая генерирует объяснение на естественном языке.

Обобщая проведенный анализ, можно констатировать следующее.

Многоагентное обучение с подкреплением относится к наиболее сложным для интерпретации системам ИИ, и конкретные решения по формированию систем ХАИ для них слабо представлены в литературе.

Существующие подходы в основном направлены на выявление логической структуры отдельного решения или политики, реализуемых отдельным агентом или усредненных по группе агентов. В большинстве работ

агенты рассматриваются как однотипные, поведенческие особенности агентов, в том числе BDI-свойства, как самостоятельный фактор не выделяются.

При использовании LLM в качестве инструмента для формирования объяснения обычно используется многостадийная процедура: вначале LLM для каждого агента или группы агентов формирует текстовое описание хода игры, из него извлекается логическая структура, и по ней создается текстовое описание, предъявляемое пользователю.

В ряде работ отмечается необходимость категоризации метрик для измерения уровня ХАИ, а также доведения методик измерения до уровня полноценных фреймворков.

Разработка фреймворка для реализации ХАИ в СПКР. СПКР, являющаяся предметом исследования в настоящей статье, реализуется в игровой среде многоагентной симуляции, которая представляет собой двухнедельный календарь по M свободных ресурсов на каждый день. Число одновременно действующих в среде агентов N задается в качестве гиперпараметра. Поведенческие особенности агентов задаются через когнитивный фреймворк Belief-Desire-Intention.

Фрагмент игровой среды показан на рисунке 1-а, соответствующий ему марковский процесс принятия решений изображен на рисунке 1-б.

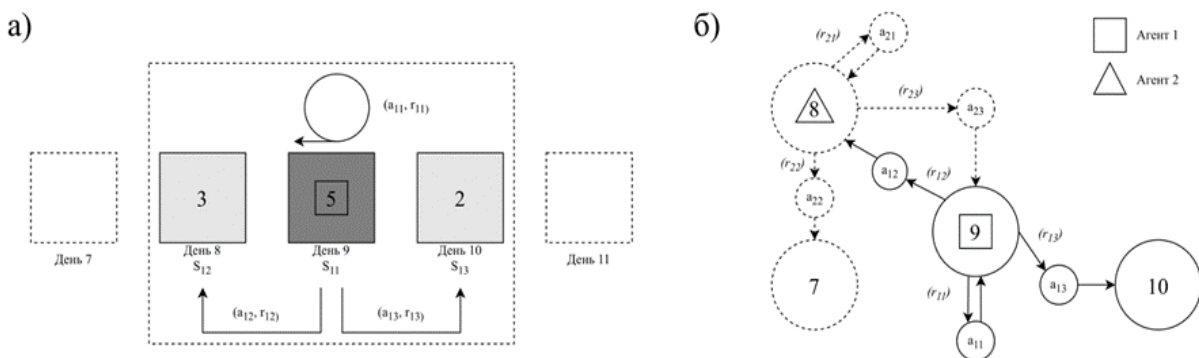


Рисунок 1 –
 а) – фрагмент игровой среды
 б) – соответствующий фрагмент процесса принятия решений

В процессе обучения модели собирается массив логов, которые в дальнейшем анализируются средствами LLM.

Эффективное использование LLM для реализации объяснимости ИИ зависит от умения правильно формулировать запросы, или промпты. В работах [26, 27] рассматриваются различные методики составления промптов к языковым моделям для получения наиболее достоверных и понятных результатов.

Для анализа логов системы мы разработали цикл промптов, руководствуясь методикой мысленной цепи (Chain of Thoughts, CoT) [28] и дополнив ее понятиями BDI. Вкратце, CoT в инженерии промптов относится к технике, при которой последовательность шагов рассуждения или промежуточных мыслей явно излагается в промпте, чтобы направлять языковую модель в сложных процессах решения проблем или принятия решений. Этот метод использует способность модели следовать шаблонам структурированного мышления, повышая ее способность давать последовательные и точные ответы, разбивая задачи на управляемые подзадачи.

Объединение концепций CoT и BDI позволило нам добиться объяснимости поведения агентов в рассматриваемой системе. Как предметное поле для анализа LLM использует лог игры. Разработанная методика представляется в виде следующего фреймворка (набора шагов).

- 1) Задать роль для LLM.
- 2) Описать контекст симуляции и конечную цель агентов.
- 3) Определить понятийный аппарат BDI.
 - a) Ввести структуру описания убеждений.
 - b) Ввести структуру описания желаний агентов.
 - c) Ввести структуру описания намерений агентов.
- 4) Описать фактические наблюдения и действия агентов.
- 5) Построить CoT.
 - a) Выделить интересующего агента.
 - b) Воссоздать BDI модель агента.
 - c) Обобщить поведение агента, отдельно выделить факторы, влияющие на мотивацию.

Разработанный фреймворк находится в русле работ по использованию различных аспектов мысленной цепи (Chain of Thoughts, CoT), формируемой в ходе промптинга LLM (см., например, обзор [29] и источники в нем). Однако предложенный в статье аспект, а именно отслеживание ролевых позиций участников игрового процесса через динамику изменения промптов, в доступной литературе не встречался, т.е. обладает элементами научной новизны.

Пример применения разработанного фреймворка представлен в Листинге 1. Фрагмент ответа LLM на сформированный промпт представлен в Листинге 2.

Листинг 1

Промпт к языковой модели

- 1) You are an intelligent system that assists in scheduling surgeries in a clinic. Your task is to find the optimal days for surgeries, considering multiple factors. You will work with observation data from agents, analyze this data, and make decisions based on it. Your role is to coordinate agents who analyze data from all other agents and make optimal decisions for scheduling surgeries.
- 2) The simulation context involves multiple agents, each observing various aspects of the current state of the clinic and trying to find the best day for performing surgeries. The ultimate goal of the agents is to optimally distribute surgeries across days to maximize the efficient use of the clinic's resources and meet patients' needs.
- 3) Read and remember this Belief-Desire-Intention (BDI) Conceptual Framework.
 - a) Beliefs structure. Urgency: rating from 1 to 3, where 1 is low urgency and 3 is high urgency. Completeness of Information: rating from 0 to 1, where 0 is incomplete information and 1 is complete information. Task Complexity: rating from 1 to 3, where 1 is low complexity and 3 is high complexity. Current Position in the Calendar for 14 Days: the agent's current position in the 14-day calendar. Slot Occupancy the Day Before: the occupancy of slots on the previous day. Slot Occupancy for the Current Day: the occupancy of slots on the current day. Slot Occupancy on the Next Day: the occupancy of slots on the next day.

- b) Desires Structure. Find the Best Day for Surgery. Considering all available data. Reduce Conflict and Competition for Slots. Among agents. Optimally Distribute Surgeries. For maximum clinic efficiency.
- c) Intentions Structure. 0 – enter the slot the next day, 1 – enter the slot the day before, 2 – do nothing.
- 4) Read and remember this fragment of the system logs: [system logs].
- 5) Chain of thought.
 - a) Please, identify the 1st agent
 - b) Then reconstruct the 1st Agent's BDI Model.
 - c) Finally, summarize the 1st Agent's Behavior. Characterize the agent's actions (passive, active), identify the motivating factors that make the agent act, and describe the dynamics of changes in the agent's physical condition.

Листинг 2

Ответ LLM на сформированный промпт

1. Beliefs: Urgency: 1 (low urgency), Completeness of Information: 1 (complete information), Task Complexity: 1 (low complexity), Current Position in the Calendar: [11, 11, 11, 11, 12], Slot Occupancy (Day Before): [3, 3, 2, 2, 3], Slot Occupancy (Current Day): [3, 4, 5, 5, 3], Slot Occupancy (Next Day): [1, 1, 1, 3, 6, 1, 2]. Desires: Find the best day for surgery, reduce slot conflicts among agents, optimize surgery distribution for clinic efficiency. Intentions (Actions): [2, 2, 2, 0, 2]

2. In summary, Agent 1 demonstrates a mostly passive behavior, driven by its beliefs of low urgency, complete information, and low task complexity. The agent only takes action in Step 4, possibly motivated by the favorable slot occupancy conditions on the next day. The dynamics of changes in Agent 1's physical condition are minimal and do not appear to have a substantial influence on its behavior.

Для оценки эффективности построенного фреймворка был составлен проблемно-ориентированный набор критериев, который в совокупности отвечает требованиям (1), (2), (3), (5), (6) [14], т.е. может рассматриваться как репрезентативный. В связи с отсутствием общепринятого бенчмарка для сравнительной оценки объяснимости с использованием LLM, была выполнена оценка самосогласованности разработанной методики по четырем различным LLM. Для этого с использованием разработанного набора критериев мы сравнили ответы четырех распространенных LLM по семи запускам игрового процесса с различными исходными данными.

Усредненные результаты проверки представлены в Таблице 1. Знак «+» означает, что требования критерия удовлетворены, «-» означает несоответствие и «+/-» – частичное соответствие.

Результаты свидетельствуют о том, что Claude Sonnet справляется с поставленной за

дачей лучше конкурирующих архитектур, демонстрируя лучшее выделение логической структуры игры в целом и поведения отдельных агентов, а также лучшую компоновку текстового материала.

Заключение. В работе рассмотрена проблема повышения объяснимости поведения агентов в СПКР на основе многоагентного обучения с подкреплением с учетом поведенческих особенностей отдельных агентов.

Проведен проблемно-ориентированный анализ способов реализации объяснимости поведения агентов. Показано, что выбранный для построения СПКР подход относится к наиболее сложным для интерпретации системам ИИ, и конкретные решения по формированию систем ХАИ для них слабо представлены в литературе.

В большинстве работ агенты рассматриваются как однотипные, поведенческие особенности агентов, в том числе BDI-свойства, как самостоятельный фактор не выделяются.

В то же время в ряде работ отмечается необходимость обоснованного подхода к отбору и формированию метрик для измерения уровня ХАИ.

В статье предложен фреймворк для реализации ХАИ в СПКР, ориентированный на представление поведенческих особенностей отдельных агентов в ходе игры, что очень важно для менеджера медицинского учреждения. Для экспериментальной оценки качества фреймворка разработан набор критериев оценки эффективности ХАИ, показана

его репрезентативность. Оценка проводилась путем сравнения объяснений, сформированных четырьмя распространенными LLM по семи запускам игрового процесса с различными исходными данными. Оценка показала хорошую воспроизводимость результатов, а также позволила выявить наиболее предпочтительную модель LLM. Предложенный подход к обеспечению объяснимости в многоагентных симуляциях открывает перспективы для дальнейшего развития и внедрения подобных систем в клиническую практику.

Таблица 1

Сравнение качества ответов разных LLM

Критерий	Тип LLM			
	HuggingChat	Gemini	Claude	Sonnet
Отсутствие орфографических ошибок	+	+	+	+
Отсутствие лексических ошибок	+	+	+	+
Отсутствие логических ошибок	–	+	+	+
Согласование времен	+	+	+	+
Использование профессиональной лексики	–	–	+	+
Разнообразие лексических конструкций	–	–	+	–
Отсутствие повторяющихся предложений	–	–	–	–
Соответствие заданному BDI шаблону	+/-	+/-	+	+

Список источников

1. Abdalkareem Z. A., Amir A., Al-Betar M. A., Ekhan, P., Hammouri A. I. Healthcare scheduling in optimization context: a review // *Health and Technology*. 2021. Т. 11. С. 445–469. (In Eng.).
2. Cardoen B., Demeulemeester E., Beliën J. Operating room planning and scheduling: A literature review // *European journal of operational research*. 2010. Т. 201. № 3. С. 921–932. (In Eng.).
3. Hancerliogullari G., Koksalmis E., Hancerliogullari K. O. Heuristics and simulated annealing algorithm for the surgical scheduling problem // *Heuristics, metaheuristics and approximate methods in planning and scheduling*. 2016. С. 225–241. (In Eng.).
4. Castro P. M., Marques I. Operating room scheduling with generalized disjunctive programming // *Computers & Operations Research*. 2015. Т. 64. С. 262–273. (In Eng.).
5. Hassanzadeh H., et al. Daily surgery caseload prediction: towards improving operating theatre

References

1. Abdalkareem Z. A., Amir A., Al-Betar M. A., Ekhan, P., Hammouri A. I. Healthcare Scheduling in Optimization Context: a Review. *Health and Technology*. 2021. Vol. 11. pp. 445–469.
2. Cardoen B., Demeulemeester E., Beliën J. Operating Room Planning and Scheduling: A Literature Review. *European Journal of Operational Research*. 2010. Vol. 201. No. 3. pp. 921–932.
3. Hancerliogullari G., Koksalmis E., Hancerliogullari K. O. Heuristics and Simulated Annealing Algorithm for the Surgical Scheduling Problem. *Heuristics, Metaheuristics and Approximate Methods in Planning and Scheduling*. 2016. pp. 225–241.
4. Castro P. M., Marques I. Operating Room Scheduling with Generalized Disjunctive Programming. *Computers & Operations Research*. 2015. Vol. 64. pp. 262–273.
5. Hassanzadeh H., et al. Daily Surgery Caseload Prediction: Towards Improving Operating Theatre

- efficiency // *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2022. Т. 22. № 1. С. 151. (In Eng.).
6. Bruni M. E., Beraldi P., Conforti D. A stochastic programming approach for operating theatre scheduling under uncertainty // *IMA Journal of Management Mathematics*. 2015. Т. 451 26. № 1. С. 99–119. (In Eng.).
7. ГОСТ Р 59276–2020 Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. Дата введения 23 декабря 2020 г. – М.: Стандартинформ, 2021. – 16 с.
8. Schwartz R., et al. A Proposal for identifying and managing bias in artificial intelligence. Draft // National Institute of Standards and Technology. Special Publication. 2021. (In Eng.).
9. Li B., et al. Trustworthy AI: From Principles to Practices // *ACM Computing Surveys*. 2023. Т. 55. № 9. С. 1–46. DOI: 10.1145/3555803. (In Eng.).
10. Linardatos P., Papastefanopoulos V., Kotsiantis S. Explainable AI: A Review of machine learning interpretability methods // *Entropy*. 2021. № 23 (1). С. 18. (In Eng.). DOI: 10.3390/e23010018.
11. Schulman J., et al. Proximal Policy Optimization Algorithms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/reader/dce6f9d4017b1785979e7520fd0834ef8cf02f4b> (In Eng.).
12. Саттон Р. С., Барто Э. Г. Обучение с подкреплением = Reinforcement Learning. 2-е издание. – М.: ДМК пресс, 2020. – 552 с.
13. Georgeff M., et al. The belief-desire-intention model of agency // *Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages: 5th International Workshop, ATAL'98 Paris, 469 France, July 4–7, 1998 Proceedings 5*. – Springer Berlin Heidelberg, 1999. – С. 1–10. (In Eng.).
14. De Gasperis G., Facchini S.D. MAS, DAO and DLT: a 3 legs architecture for intelligent services // *6th Distributed Ledger Technologies Workshop (DLT2024)*, May 14-15, 2024, Turin, Italy. (In Eng.).
15. Alzetta F, Giorgini P, Najjar A, Schumacher MI, Calvaresi D. In-time explainability in multi-agent systems: challenges, opportunities, and roadmap // *Explainable, Transparent Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2020. Т. 12175. С. 39–53. DOI: 10.1007/978-3-030-51924-7_3. (In Eng.).
16. Ciatto G., et al. Towards XMAS: eXplainability through multi-agent systems // *Artificial Intelligence and Internet of Things*. 2019. Т. 2502. Ст. 3. (In Eng.).
17. Heuillet A., Couthouis F., Díaz-Rodríguez N. Explainability in deep reinforcement learning // *Knowledge-Based Systems*. 2021. Т. 214. С. 106685. DOI: 10.1016/j.knosys.2020.106685. (In Eng.).
18. Milani S., et al. Explainable reinforcement learning: a survey and comparative review // *ACM Computing Surveys*. 2023. Т. 56. № 7. С. 1–36. DOI: 10.1145/36168. (In Eng.).
- Efficiency. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2022. Vol. 22. No. 1. P. 151.
6. Bruni M. E., Beraldi P., Conforti D. A Stochastic Programming Approach for Operating Theatre Scheduling under Uncertainty. *IMA Journal of Management Mathematics*. 2015. Vol. 451 26. No. 1. pp. 99–119.
7. GOST R 59276–2020 Artificial Intelligence Systems. Methods of Ensuring Trust. General Provisions. Date of introduction December 23, 2020. *Moscow, Standartinform*. 2021. 16 p. (In Russ.).
8. Schwartz R., et al. A Proposal for Identifying and Managing Bias in Artificial Intelligence. Draft. *National Institute of Standards and Technology. Special Publication*. 2021.
9. Li B., et al. Trustworthy AI: From Principles to Practices. *ACM Computing Surveys*. 2023. Vol. 55. No. 9. pp. 1–46. DOI: 10.1145/3555803.
10. Linardatos P., Papastefanopoulos V., Kotsiantis S. Explainable AI: A Review of Machine Learning Interpretability Methods. *Entropy*. 2021. No. 23 (1). pp. 18. DOI: 10.3390/e23010018.
11. Schulman J., et al. Proximal Policy Optimization Algorithms. Available at: <https://www.semanticscholar.org/reader/dce6f9d4017b1785979e7520fd0834ef8cf02f4b>
12. Sutton R. S., Barto E. G. Reinforcement Learning. 2nd edition. *Moscow, DMK press*. 2020. 552 p. (In Russ.).
13. Georgeff M., et al. The belief-desire-intention model of agency. *Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages: 5th International Workshop, ATAL'98 Paris, 469 France, July 4–7, 1998 Proceedings 5*. *Springer Berlin Heidelberg*. 1999. pp. 1–10.
14. De Gasperis G., Facchini S.D. MAS, DAO and DLT: a 3 Legs Architecture for Intelligent Services. *6th Distributed Ledger Technologies Workshop (DLT2024)*, May 14-15, 2024, Turin, Italy.
15. Alzetta F, Giorgini P, Najjar A, Schumacher MI, Calvaresi D. In-Time Explainability in Multi-Agent Systems: Challenges, Opportunities, and Roadmap. *Explainable, Transparent Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2020. Т. 12175. С. 39–53. DOI: 10.1007/978-3-030-51924-7_3.
16. Ciatto G., et al. Towards XMAS: eXplainability Through Multi-Agent Systems. *Artificial Intelligence and Internet of Things*. 2019. Vol. 2502. Paper 3.
17. Heuillet A., Couthouis F., Díaz-Rodríguez N. Explainability in Deep Reinforcement Learning. *Knowledge-Based Systems*. 2021. Vol. 214. pp. 106685. DOI: 10.1016/j.knosys.2020.106685.
18. Milani S., et al. Explainable Reinforcement Learning: A Survey and Comparative Review. *ACM Computing Surveys*. Vol. 56. No. 7. pp. 1–36. DOI: 10.1145/36168.

19. Doshi-Velez F., Kim B. Towards a rigorous science of interpretable machine learning. 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1702.08608.pdf> (In Eng.).
20. Wells L., Bednarz T. Explainable AI and reinforcement learning – a systematic review of current approaches and trends. 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3389/frai.2021.550030> (In Eng.).
21. Zhao H., et al. Explainability for Large Language Models: a survey [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2309.01029> (In Eng.).
22. Luo H., Specia L. From understanding to utilization: a survey on explainability for Large Language Models [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2401.12874> (In Eng.).
23. Han S., Zhang, Yao Q., Y., Jin W., Xu Z., He Ch. LLM Multi-Agent systems: challenges and open problems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2402.03578> (In Eng.).
24. Agiollo A., Siebert L. C., Murukannaiah P. K., et al. From Large Language Models to small logic programs: building global explanations from disagreeing local post-hoc explainers // SpringerNature Link [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10458-024-09663-8> (In Eng.).
25. Zhang X., et al. Explaining agent behavior with Large Language Models [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2309.10346> (In Eng.).
26. Sahoo P., et al. A Systematic survey of prompt engineering in Large Language Models: techniques and applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2402.07927> (In Eng.).
27. Chen B., et al. Unleashing the potential of prompt engineering in Large Language Models: 476 a comprehensive review [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2310.14735> (In Eng.).
28. Wei J., et al. Chain-of-thought prompting elicits reasoning in Large Language Models // 478 Advances in neural information processing systems. 2022. Т. 35. С. 24824–24837. (In Eng.).
29. Sahoo P., et al. A Systematic Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Techniques and Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2402.07927> (In Eng.).
19. Doshi-Velez F., Kim B. Towards a Rigorous Science of Interpretable Machine Learning. 2017. Available at: Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1702.08608.pdf> (In Eng.).
20. Wells L., Bednarz T. Explainable AI and Reinforcement Learning – A Systematic Review of Current Approaches and Trends. Available at: <https://doi.org/10.3389/frai.2021.550030>
21. Zhao H., et al. Explainability for Large Language Models: A Survey. Available at: <https://arxiv.org/abs/2309.01029>
22. Luo H., Specia L. From Understanding to Utilization: A Survey on Explainability for Large Language Models. Available at: <https://arxiv.org/abs/2401.12874>
23. Han S., Zhang, Yao Q., Y., Jin W., Xu Z., He Ch. LLM Multi-Agent Systems: Challenges and Open Problems. Available at: <https://arxiv.org/abs/2402.03578>
24. Agiollo A., Siebert L. C., Murukannaiah P. K., et al. From Large Language Models to Small Logic Programs: Building Global Explanations from Disagreeing Local Post-hoc Explainers. *SpringerNature Link* Available at: <https://doi.org/10.1007/s10458-024-09663-8>
25. Zhang X., et al. Explaining agent behavior with Large Language Models. Available at: <https://arxiv.org/abs/2309.10346>
26. Sahoo P., et al. A Systematic Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Techniques and Applications. Available at: <https://arxiv.org/abs/2402.07927>
27. Chen B., et al. Unleashing the Potential of Prompt Engineering in Large Language Models: 476 a Comprehensive Review. Available at: <https://arxiv.org/abs/2310.14735>
28. Wei J., et al. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models. *478 Advances in Neural Information Processing Systems*. 2022. Vol. 35. pp. 24824–24837.
29. Sahoo P., et al. A Systematic Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Techniques and Applications. Available at: <https://arxiv.org/abs/2402.07927>

Научная статья
УДК 004.89
doi: 10.17586/2713-1874-2024-4-60-68

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЛИЗОВ В AGILE-КОМАНДАХ НА ОСНОВАНИИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Максим Игоревич Ардатовский¹✉, Татьяна Геннадьевна Максимова²

^{1,2}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
¹ardatovskym@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0009-0004-3851-2762>
²tgmaximova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8532-7963>
Язык статьи – русский

Аннотация: В статье произведен анализ практик планирования релизов и распределения задач в условиях гибкого управления проектами по методологии agile с применением методов многокритериальной оптимизации и генетических алгоритмов. Разработан комбинированный метод, решающий задачу выбора требований для релиза (Next Release Problem) на основе алгоритма NSGA-II и оптимизации расписания задач с учетом ограничений по ресурсам и последовательности выполнения этапов (Resource Constrained Project Scheduling Problem). Описаны особенности использования библиотеки DEAP на языке Python для реализации эволюционных вычислений, а также применение библиотеки NumPy для ускорения векторных операций и Matplotlib для визуализации результатов. Представлена архитектура программного решения, включающая модульную организацию кода и интеграцию пользовательских эвристик для построения оптимальных расписаний. Приведено описание функций оценки полезности, рисков и штрафов за нарушения зависимостей и ресурсных ограничений, а также применение методов кроссовера и мутации для словарных структур расписаний. Показана итеративная оптимизация, связывающая этапы отбора эпиков и построения расписаний для достижения устойчивого оптимума. Экспериментальная проверка подтвердила эффективность предложенного подхода, так как в ней достигается максимизация полезности набора эпиков, минимизация штрафов и простоя сотрудников при построении оптимального расписания. Разработанная система применима для комплексного планирования релизов в Agile-командах и формирует основу для дальнейших исследований в области гибкого проектного управления и ресурсной оптимизации.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, генерация расписаний, генетические алгоритмы, планирование релизов agile, управление ресурсами

Ссылка для цитирования: Ардатовский М. И., Максимова Т. Г. Комбинированный метод планирования релизов в Agile-командах на основании генетических алгоритмов // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 4. С. 60–68. <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-60-68>.

COMBINED METHOD OF RELEASE PLANNING IN AGILE TEAMS BASED ON GENETIC ALGORITHMS

Maksim I. Ardatovskiy¹✉, Tatiana G. Maximova²

^{1,2}ITMO University, Saint Petersburg, Russia
¹ardatovskym@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0009-0004-3851-2762>
²tgmaximova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8532-7963>
Article in Russian

Abstract: The paper analyzes the practices of release planning and task allocation in agile project management using multi-criteria optimization methods and genetic algorithms. A combined method that solves the problem of selecting requirements for release (Next Release Problem) based on NSGA-II algorithm and optimization of task scheduling considering resource constraints and sequence of stages (Resource Constrained Project Scheduling Problem) is developed. The peculiarities of using DEAP library in Python to implement evolutionary computations are described, as well as the use of NumPy library to accelerate vector operations and Matplotlib to visualize the results. The architecture of the software solution is presented, including modular code organization and integration of custom heuristics for building optimal schedules. The description of utility, risk and penalty functions for dependency violations and resource constraints is given, as well as the application of crossover and mutation methods for dictionary structures of schedules. Iterative optimization linking the stages of epics selection and schedule construction to reach a stable optimum is shown. Experimental validation confirmed the effectiveness of the proposed approach as it achieves utility maximization of the set of epics, minimization of penalties and idle time of employees in constructing optimal schedules. The developed system is

applicable for complex release scheduling in Agile teams and forms the basis for further research in agile project management and resource optimization.

Keywords: agile, genetic algorithms, multi-criteria optimization, release planning, resource management, schedule generation

For citation: Ardatovsky M. I., Maximova T. G. Combined Method of Release Planning in Agile Teams Based on Genetic Algorithms. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 4. pp. 60–68. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-60-68>.

Введение. Современные подходы к разработке программного обеспечения значительно изменились благодаря внедрению методологии Agile, которая сместила акцент с жесткой структуры процессов на гибкость, сотрудничество и удовлетворение запросов клиентов, что делает её незаменимой в условиях динамично меняющихся требований [1]. Agile завоевал популярность в различных сферах благодаря своей способности преодолевать ограничения традиционных моделей управления проектами, таких как waterfall, которому присуще негибкость и низкая адаптивность к новым задачам [2].

Среди множества аспектов Agile особое внимание следует уделить процессам планирования релизов и управления задачами. Планирование релизов обеспечивает стратегическую основу для регулярных релизов функциональности и включает прогнозирование зависимостей, согласование усилий и адаптацию команды к меняющимся требованиям [3]. Управление задачами, в свою очередь, направлено на эффективное распределение ролей, устранение узких мест и оптимизацию командной работы.

Тем не менее, планирование релизов и управление задачами остаются одними из самых сложных аспектов для многих Agile-команд. Что обусловлено необходимостью баланса между гибкостью и долгосрочным видением проекта. Современные решения включают использование совместных платформ и аналитических инструментов для предиктивного управления, однако их реализация может варьироваться в зависимости от контекста проекта и используемых технологий [4].

Литературный обзор. На данный момент существует множество методов и алгоритмов, направленных на решение задач планирования и оптимизации расписаний. Классические подходы включают линейное и целочисленное программирование, динамичес-

кое программирование и различные эвристические методы. В контексте проблемы выбора требований для следующего релиза (Next Release Problem, NRP) широко используются многокритериальные оптимизационные методы, такие как алгоритм NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [5]. Для решения проблемы составления расписания проектов с ограниченными ресурсами (Resource Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP) применяются генетические алгоритмы, табу-поиск и другие эволюционные методы [6,7]. Обе проблемы являются NP-полными задачами, поэтому в основном для их решения используются эвристические алгоритмы. С другой стороны, некоторые авторы предлагают альтернативный подход к выбору оптимального пути выполнения проекта путем разбиения проекта на партии [8].

Одним из ключевых направлений является исследование планирования релизов на основе пользовательских предпочтений. Например, работа [9] предлагает подход, основанный на анализе зависимостей и предпочтений пользователей, который позволяет улучшить планирование и адаптировать релизы под требования конечных потребителей. Данное исследование подчеркивает значимость учета пользовательских данных при разработке программного обеспечения.

Сложности, связанные с гибким планированием проектов с ограниченными ресурсами, рассматриваются в исследовании [10]. Исследование предлагает гибридный алгоритм дифференциальной эволюции, направленный на решение задач, связанных с проектным планированием, включая динамическую структуру проектов и управление ресурсами, что особенно актуально для крупных и долгосрочных проектов, где требуется высокая адаптивность.

Исследования по изучению NRP [11, 12] исследуют оптимизационные подходы для управления приоритетами задач и выделения

ресурсов в условиях ограничения времени и бюджета. Работы демонстрируют, что применение многокритериального анализа и эмпирических данных позволяет улучшить результаты планирования и удовлетворить ожидания заинтересованных сторон. Работа [13] показывает, что применение алгоритмов роя позволяет находить более эффективные решения для задачи NRP, а в статье [14] оценивается использование нейронных сетей для оценки усилий в рамках Agile-разработки. Такие подходы показывают потенциал машинного обучения в оптимизации процессов планирования релизов. Ряд исследований рассматривают управление заинтересованными сторонами и идентификации их требований. Например, в работе [15] предлагается структурированный подход к идентификации стейкхолдеров в автомобильной промышленности, что способствует более осмысленному и согласованному планированию релизов.

Однако, несмотря на значительный прогресс, остаются нерешенные вопросы. Комплексное исследование [5] представляет собой систематический обзор литературы по задаче NRP, которое показывает, что, несмотря на обширные исследования в этой области, нет единого подхода к решению NRP, который бы охватывал все аспекты, включая учет ограничений, предпочтений стейкхолдеров и доступности ресурсов. Что свидетельствует о необходимости дальнейших эмпирических исследований для разработки более универсальных и адаптивных решений. Кроме того, работа [6] отмечает, что внедрение методов машинного обучения в процесс планирования релизов находится на ранней стадии и требует дальнейших испытаний. Наконец, стоит отметить влияние ограничений ресурсов на процесс планирования расписаний. Исследование [7] рассматривает применение эволюционных алгоритмов для решения задачи RCPSP, показывая, что такие подходы могут существенно повысить эффективность работы в условиях ограниченных ресурсов.

Основная проблема в существующих работах заключается в отсутствии интегрированного подхода к планированию, который одновременно учитывал бы выбор требований для релиза и возможности команды по их реализации в рамках ограничений ресурсов и времени. Отдельные эвристические методы

не обеспечивают достаточной гибкости и адаптивности, необходимые для эффективного планирования в условиях неопределенности и динамично меняющихся требований как со стороны планирования задач, так и со стороны планирования расписаний.

Аналогичные выводы относятся и к традиционным точным методам, так как обе рассматриваемые задачи являются NP-полными и предполагают высокую комбинаторную сложность с множеством различных условий и параметров, а также критериев оптимизации. Для применения точных методов в контексте данных задач потребовалось бы выполнение целого ряда допущений, таких как сокращение критерия оптимизации до одного, упрощение структуры эпиков и ресурсов расписаний. Например, в контексте задачи NRP её упрощение до однокритериальной задачи сводилось бы к задаче о рюкзаке. В этом случае основная цель была бы в максимизации полезности выбранных эпиков при ограничениях на ресурсы, что накладывало бы на него дополнительные ограничения. Подобные ограничения снижают возможность практического применения алгоритма, а также приводят к уходу от конвенциональной постановки решаемых задач.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма планирования agile релиза, который объединяет решение NRP с использованием многокритериального метода NSGA-II и решение RCPSP с помощью генетических алгоритмов, учитывая при этом возможности команды и ограниченные ресурсы.

Методы и материалы исследования. Формальную постановку задачи первого этапа работы алгоритма можно описать как, необходимо найти и запланировать набор эпиков, максимизирующий полезность и минимизирующий риск. Набор эпиков представляет собой вектор длины N , где N – количество эпиков, и каждый бит (0 или 1) означает, включен ли эпик в набор. Тогда полезность набора эпиков выражается:

$$U(x) = \sum_{i=1}^N x_i * u_i, \quad (1)$$

где $x_i \in \{0,1\}$ – решение о включении эпика i , u_i – полезность эпика i .

Для учета затрат по ролям необходимо предусмотреть, чтобы суммарные часы по

каждой роли не превышали доступные ресурсы. Если для роли r сумма часов превысила лимит, то накладывается штраф.

Тогда риск оценивается как:

$$R(x) = \sum_{i=1}^N x_i (\sum_r h_{i,r}, d_r), \quad (2)$$

где $h_{i,r}$ – количество часов на выполнение эпика i по роли r , а d_r – отклонение по роли r .

Дополнительно на функцию приспособленности накладываются штрафы за невыполненные зависимости, так, если эпик j зависит от эпика k , а k не выбран ($x_k=0$), то добавляется штраф $P_{dep}(x)$

Итоговая функция приспособленности для многокритериального NSGA-II рассчитывается как:

$$fitness(x) = (U(x) - P_{dep}(x), R(x)). \quad (3)$$

Алгоритм используются для максимизации первой компоненты (полезность минус штраф) и одновременно минимизации риска, NSGA-II проводит эволюцию, обеспечивая построение финальной популяции особей, которая представляет собой Парето-фронт. В контексте рассматриваемой многокритериальной задачи Парето-фронт позволяет получить множество компромиссных решений с разным соотношением «полезность–риск», из которых затем дополнительно отбирается лучшая особь из популяции на основании критерия максимизации функции приспособленности по первой цели и, при равенстве этого критерия, минимизации по второй цели, так как общая полезность является более приоритетным критерием по сравнению с размером рисков

Далее на втором этапе работы алгоритма на основе набора эпиков составляется расписание. Расписание по сути является списком задач, которые выполняются определенным сотрудником определенной роли в определенном временном промежутке. Для ускорения процесса поиска решения и повышения качества выполнения в NP-трудных задач в нее накладываются дополнительно эвристики планирования.

1) Задачи размещаются в доступные промежутки, стараясь минимизировать разрывы между этапами эпика.

2) Если задача не может быть размещена для эпика, эпик полностью исключается из расписания.

3) Для каждого эпика проверяется, все ли роли выполнены, все ли зависимости удовлетворены, не нарушен ли порядок.

Для оценки заданного расписания дополнительно необходимо обозначить:

X – множество эпиков, вошедших в расписание.

D – общее время завершения последней задачи

P – суммарный штраф за невыполненные зависимости между эпиками, которые возникают при наличии таких связей, как комбинация (два эпика необходимы одновременно), импликация (один эпик необходим для выполнения другого) и исключение (два эпика противоречат друг другу) – P_{dep} , частично выполненные эпика – P_{part} , нарушения порядка этапов – P_{seq} , выход за пределы релиза/занятость сотрудника – P_{res} , тогда итоговый P будет равен:

$$P = P_{dep} + P_{part} + P_{seq} + P_{res}. \quad (4)$$

I – суммарный простой сотрудников, который рассчитывается как сумма всех дней, когда сотрудник не занят.

$$I = \sum_{i=1}^N \sum_{d=0}^D \mathbf{1}(y_{i,d} = 0), \quad (5)$$

где i – порядковый номер сотрудника, N – количество сотрудников, d – порядковый номер дня, $\mathbf{1}(\ast)$ – индикаторная функция, значение которой равно единице в случае, если условия внутри нее верно и нулю в противном случае, $y_{i,d}$ – бинарная переменная занятости сотрудника i в день d

Общая полезность запланированных эпиков записывается как:

$$U_{plan} = \sum_{x \in X} u_x. \quad (6)$$

Теперь необходимо минимизировать функцию приспособленности расписания, которая рассчитывается как:

$$fitness(plan) = D + P + I - \alpha U_{plan}, \quad (7)$$

где α – положительный коэффициент, определяющий вес полезности. Чем больше

U_{plan} , тем меньше значение функции, а следовательно, тем лучше решение в целом.

Таким образом, разработанный на втором этапе генетический алгоритм по составлению расписания задач минимизирует время, штрафы, простой и при этом стремится максимизировать полезность задачи.

Ключевой составляющей работы алгоритма, предоставляющему ему преимущества над ранее изученными является итеративная оптимизация, которая подразумевает итерации, на каждой из которой:

1) Осуществляется отбор эпиков методом NSGA-II.

2) Осуществляется построение расписания для отобранных эпиков методом GA.

3) Осуществляется оценка решения по формуле, которая учитывает параметр полезности и значение функции принадлежности:

$$score = U_{plan} * fitness(plan) . \quad (8)$$

4) Итерации продолжаются, пока улучшение не станет незначительным.

Таким образом, алгоритм на первой фазе решает задачу многокритериальной оптимизации:

$$\max_x U(x) - P_{dep}(x), \min_x R(x) . \quad (9)$$

Тогда как вторая фаза решает задачу минимизации:

$$\min_{plan} [D(plan) + P(plan) + I(plan) - \alpha U_{plan}(plan)] \quad (10)$$

Вследствие чего обе фазы связываются в итеративный цикл, улучшая решение, пока не достигнет стабильного оптимума по критерию score.

Обеспечение допустимости решения осуществляется посредством удовлетворения всех ограничений, накладываемых на задачу. Для чего на обеих фазах алгоритм контролирует соблюдение ресурсных лимитов, последовательности зависимостей и прочих условий. Так, если при формировании набора эпиков суммарные часы для роли r превышают доступный лимит, то решение получает штраф P_{res} , достаточный для его отсеивания эволюционным механизмом NSGA-II. Аналогично обрабатываются невыполненные зави-

симости между эпиками, например если для выполнения эпика i необходимо реализовать эпик k , но $x_k = 0$, то добавляется штраф P_{dep} . На этапе построения расписания для отобранных эпиков проверяется, возможно ли полностью разместить все задачи эпика с учетом доступности сотрудников нужной роли и заданных временных промежутков. Для этого вводится переменная $w_{(i,r,d)}$, обозначающая объем в человеко-часах выполнения эпика i с ролью r в день d и накладывается ограничение вида:

$$\sum_{d=1}^D w_{i,r,d} \geq w_{i,r} * x_i . \quad (11)$$

Данное ограничение гарантирует, что при включении эпика i в план, часы работы для каждой роли r будут полностью запланированы, а если не включен в план, то ресурсы для него не выделяются.

Используемый подход позволяет алгоритму понижать решения с нарушениями так, чтобы они не проходили в итоговую популяцию, либо значительно снижали свой ранг при отборе по Парето-фронт. В результате таких ограничивающих требований алгоритм постепенно эволюционирует к решениям, которые не только оптимальны, но и допустимы.

Результаты исследования. Для реализации проекта был выбран язык программирования Python, поскольку он обладает развитой экосистемой для задач по оптимизации, специализированных вычислений и визуализации данных, а также обеспечивает быструю скорость разработки. В качестве основных компонентов были использованы библиотека NumPy для ускорения векторных и матричных операций, фреймворк DEAP для эволюционных вычислений и библиотека Matplotlib для визуализации результатов в виде диаграммы Ганта.

Дополнительно в работе применялись стандартные модули Python, такие как collections, random и datetime, обеспечивающие упрощение работы со структурами данных, генерацией случайных чисел и сохранением меток времени для результатов. Программный код имеет модульную структуру и разделен на несколько логических компонентов, что обеспечивает читаемость и гибкость кода. На этапе генерации данных для

первичных тестов эпика и сотрудники инициализировались с использованием псевдослучайных чисел. Для воспроизводимости экспериментов были зафиксированы семена генераторов случайных чисел с помощью `random.seed` и `np.random.seed`.

Оценка эпиков в рамках алгоритма NSGA-II осуществлялась на основе функции, вычисляющей полезность, риск и штрафы в методе `evaluate_individual`, которая использует двухкомпонентный подход, на первом этапе которого бинарный вектор указывает на включение эпика, тогда как штрафы за невыполненные зависимости считаются отдельно. На этом этапе также были зарегистрированы типы и операторы эволюции через `creator` и `toolbox` из библиотеки DEAP.

В процессе планирования расписаний функция приспособленности оценивалась с учетом таких критериев, как длительность выполнения задачи, простой сотрудников, штрафы и суммарная полезность, что описано в методе генерации расписания `generate_schedule_individual`. Функции кроссовера и мутации были описаны с использованием специальных операторов для словарных структур, которые описывают расписания задач по ролям и сотрудникам. Также были описаны эвристики для формирования логики построения расписаний, в них учитывалось, что для каждого эпика задачи распределяются среди сотрудников в соответствии с доступным временем и этапами выполнения, что учитывалось в методе оценки расписания `evaluate_schedule`.

Итеративный процесс оптимизации, комбинирующий NSGA-II для отбора эпиков и генетический алгоритм для планирования расписаний был реализован в отдельном методе `evaluate_solution`, а визуализация результатов, включая построение диаграммы Ганта на основе финального решения реализовано в методе `main`.

Важной особенностью данной реализации является гибкость настройки параметров алгоритма, поскольку основные структуры данных DEAP (типы индивидуумов, операторы кроссовера и мутации) определяются на этапе инициализации основного кода, что облегчает параметризацию и модификацию алгоритмов. В качестве функций кроссовера и мутации выступали `sxTwoPointDict` и

`mutShuffleDict`, так как они корректно работают со словарями, описывающими расписание задач.

Применение NumPy позволяет ускорить выполнение векторных операций, а модульная структура кода облегчает профилирование и последующую оптимизацию кода. Выбор Python и фреймворка DEAP обеспечил гибкость реализации, позволив быстро внедрять новые эвристики, изменять параметры алгоритмов и адаптировать решения под требования задачи комплексного планирования эпиков. Исходный код разработанного алгоритма доступен на платформе GitHub по адресу <https://github.com/Flyneot/GenPlan>.

Экспериментальная проверка. Проверка разработанной системы на возможность эффективно отбирать эпика и составлять для них расписание, учитывая заданные ресурсы и ограничения требует формирования метрик полезности итогового набора эпиков, суммарные временные затраты на их реализацию, отсутствие значительных штрафов за нарушение последовательности задач внутри эпиков и выполнение зависимостей между ними, оптимальность распределения по сотрудникам (сумма простая)

Так, были сгенерированы 50 эпиков со случайным распределением часов по ролям (`backend`, `frontend`, `design`, `analytics` и `testing`) и случайной полезностью. Количество сотрудников и длительность релиза (60 дней) заданы таким образом, чтобы количество доступных трудовых ресурсов было в среднем достаточным для планирования нескольких эпиков. Генетический алгоритм NSGA-II для отбора эпиков запускался на 200 поколений с размером популяции 300, а для составления расписания применялся аналогичный по параметрам генетический алгоритм, но уже с другим типом индивидуумов (расписание).

Анализ штрафов, рассчитанных алгоритмом, показал, что большинство эпиков выполнены без критичных нарушений последовательности. Небольшие задержки между этапами влекут за собой умеренные штрафы, однако общая полезность перевешивает данные издержки. Итоговый набор эпиков, вошедший в расписание, обеспечивает суммарную полезность, близкую к верхним значениям, достигнутым в процессе прохождения

итерационного цикла. В ходе апробации было проверено, что увеличение коэффициента важности полезности в целевой функции действительно стимулирует включение более «выгодных» эпиков, даже при некотором увеличении временных интервалов или простоев.

Для проверки эффективности была проведена серия тестов, в одном из которых не применялись штрафы и не учитывалась полезность. В таком случае алгоритм выдавал решения, включавшие большее количество эпиков, но с низкой совокупной ценностью и значительными простоем. После включения в оценку полезности и штрафов улучшилось качество отобранных эпиков – выбирались более полезные, а общее время и простой стали ниже за счет попыток минимизации итоговой функции приспособленности. Таким образом, текущее решение превосходит «наивный» подход как по полезности, так и по согласованности планирования.

Проведенный эксперимент показал, что разработанный алгоритм достигает следующих целей.

1) Оптимизируется не только количество эпиков, но и их совокупная полезность.

2) Учитываются ограничения по ролям и последовательности этапов, что подтверждается низкими штрафами за некорректный порядок задач.

3) Решение способно распределить задачи по сотрудникам так, чтобы итоговая диаграмма Ганта была достаточно плотной и сбалансированной, при этом максимизируя полезность набора работ.

На рисунке 1 представлено итоговое расписание, полученное после нескольких итераций отбора эпиков и составления расписаний. По оси Y расположены сотрудники, сгруппированные по ролям. По оси X расположена временная шкала (дни релиза). Каждый прямоугольник соответствует отдельной задаче одного из эпиков, располагаясь по временной оси согласно старту и длительности, а по вертикали – согласно назначенному сотруднику. На диаграмме видно, что задачи распределены между сотрудниками разных ролей в соответствии с их специализацией. Хотя между задачами встречаются интервалы бездействия, общая загрузка выглядит сбалансированной.

Благодаря рисунку видно, что система формирует осмысленное распределение задач, в которой сотрудники одинаковой роли нагружены задачами разных эпиков в разные промежутки времени, без катастрофических простоев или параллельных конфликтов. Итоговые метрики позволяют заключить, что при данном наборе параметров и данных система генерирует решения, приближенные к «выгодному» балансу между полезностью, риском, длительностью и эффективностью использования ресурсов.

Таким образом, экспериментальная проверка подтверждает применимость и эффективность предложенного подхода.

Заключение. В рамках исследования был разработан комбинированный метод планирования релизов в Agile-командах на основе генетических алгоритмов и метода многокритериальной оптимизации NSGA-II. Разработанный алгоритм включает два этапа заключенных в цикл. На первом этапе применяется алгоритм NSGA-II для решения задачи многокритериального выбора эпиков с учетом их полезности, рисков и ограничений на зависимости. На втором этапе генетический алгоритм используется для оптимизации расписаний, минимизации простоев сотрудников, штрафов за некорректное распределение задач и максимизации общей полезности релиза. Оба этапа повторяются до тех пор, пока система не получит устойчивый оптимальный результат.

Экспериментальная проверка продемонстрировала, что предложенный метод эффективно решает поставленные задачи, достигая оптимизации количества и полезности отобранных эпиков, минимизации штрафов за несоблюдение зависимостей и порядок выполнения этапов и уменьшения простоев сотрудников, и повышение эффективности использования ресурсов. Результаты экспериментов подтвердили практическую значимость предложенного подхода и его способность формировать решения, приближенные к оптимальным.

Таким образом, предложенная методология решает задачу комплексного планирования релизов, обеспечивая баланс между полезностью, риском, ресурсными ограничениями и эффективностью распределения задач. В дальнейшем развитии темы может быть

исследован учет дополнительных факторов, таких как стоимостные ограничения, приоритеты заказчиков и динамическая изменчивость требований, разработка моделей для учета квалификации сотрудников и их

реальной производительности, а также интеграция предложенного алгоритма с алгоритмами машинного обучения для предсказания оптимальных решений на основе исторических данных.

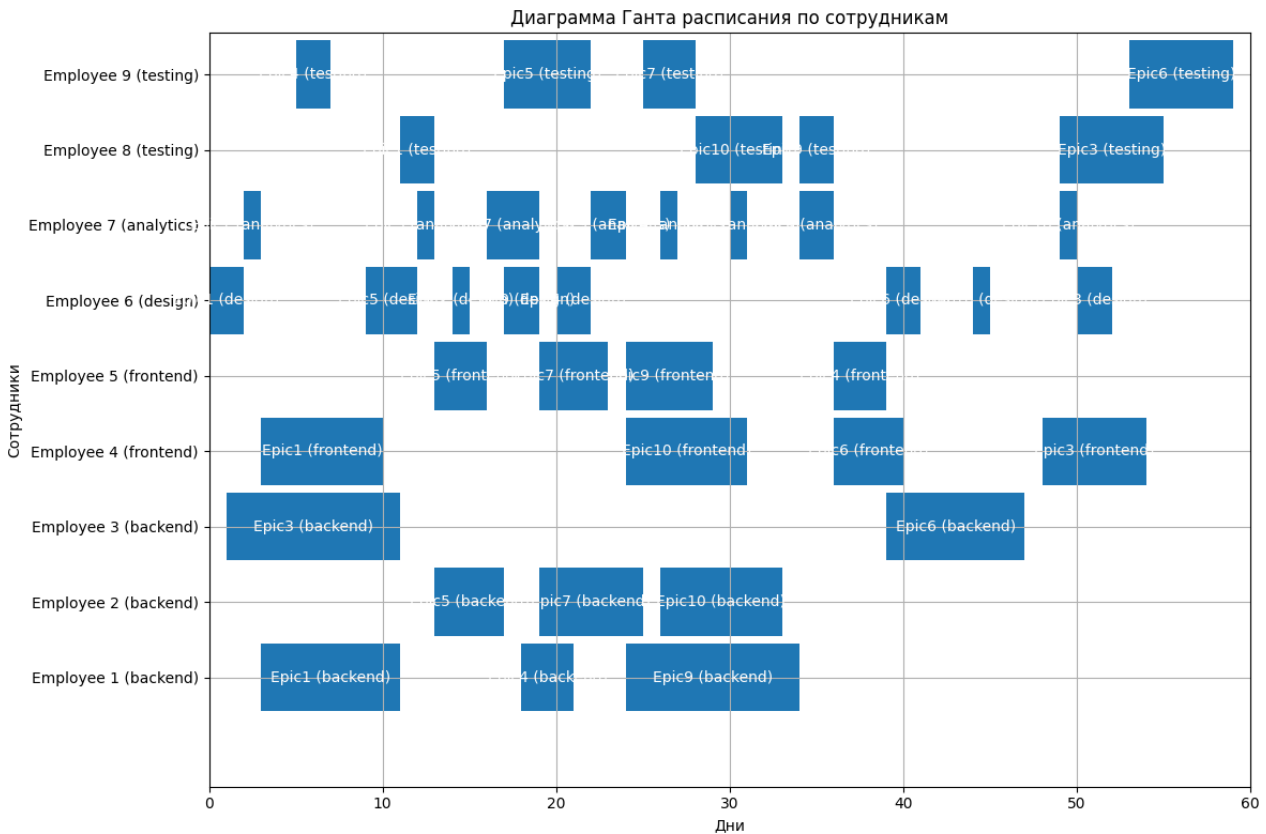


Рисунок 1 – Диаграмма Ганта для тестового релиза

Источник: составлено авторами

Список источников

1. Beck K., Beedle M., van Bennekum, A., et al. Manifesto for Agile Software Development. 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://agilemanifesto.org/> (In Eng.).
2. Highsmith J. Agile Project Management: Creating Innovative Products. 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/234809670_Agile_Project_Management_Creating_Innovative_Products (In Eng.).
3. Leffingwell D. Agile Software Requirements: Lean Requirements Practices for Teams, Programs, and the Enterprise. – Addison-Wesley Professional, 2010. – 560 С. (In Eng.).
4. Ramesh B., Cao L., Baskerville R. Agile requirements engineering practices: An empirical study // *IEEE Software*. 2012. № 25 (1). С. 60–67. (In Eng.).
5. Umer Iqbal, Khubaib Amjad Alam. Next Release Problem: A Systematic Literature Review // *KIET Journal of Computing and Information Sciences*. 2020. № 3 (1). С. 16. (In Eng.).

References

1. Beck K., Beedle M., van Bennekum, A., et al. Manifesto for Agile Software Development. 2001. Available at: <https://agilemanifesto.org/>
2. Highsmith J. Agile Project Management: Creating Innovative Products. 2009. Available at: https://www.researchgate.net/publication/234809670_Agile_Project_Management_Creating_Innovative_Products
3. Leffingwell D. Agile Software Requirements: Lean Requirements Practices for Teams, Programs, and the Enterprise. *Addison-Wesley Professional*, 2010. 560 p.
4. Ramesh B., Cao L., Baskerville R. Agile Requirements Engineering Practices: An Empirical Study. *IEEE Software*. 2012. No. 25 (1). pp. 60–67.
5. Umer Iqbal, Khubaib Amjad Alam. Next Release Problem: A Systematic Literature Review. *KIET Journal of Computing and Information Sciences*. 2020. No. 3 (1). P. 16.

6. Nigar N., Shahzad M., Islam Sh., Oki O., Lukose J. Multi-Objective Dynamic Software Project Scheduling: A Novel Approach to Handle Employee's Addition. *IEEE Access*. 2023. Т. 11. С. 39792–39806. (In Eng.). DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3265716.
7. Minku L., Sudholt D., Yao Xi. Evolutionary Algorithms for the Project Scheduling Problem: Runtime Analysis and Improved Design // *GECCO'12. Proceedings of the 14th International Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. 2012. С. 1221–1228. (In Eng.). DOI: 10.1145/2330163.2330332.
8. Пунтиков А. Н., Шиков А. Н. Алгоритм разбиения проекта на партии при гибких технологиях планирования // *Экономика. Право. Инновации*. 2023. № 4. С. 81–91. DOI: 10.17586/2713-1874-2023-4-81-91
9. Mougouei D., Powers D. Dependency-Aware Software Release Planning through Mining User Preferences // *Soft Computing*. 2020. Т. 24. С. 11673–11693. (In Eng.). DOI: 10.1007/s00500-019-04630-y.
10. Van der Beek T., Souravlias D., van Essen J.T., Pruyn J., Aardal K. Hybrid differential evolution algorithm for the resource constrained project scheduling problem with a flexible project structure and consumption and production of resources // *European Journal of Operational Research*. 2024. Т. 313. № 1. С. 92–111. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.ejor.2023.07.043.
11. Durillo J., at al. A study of the bi-objective next release problem // *Empirical Software Engineering*. 2011. Т. 16. С. 29–60. (In Eng.). DOI: 10.1007/s10664-010-9147-3.
12. Bagnall A. J., Rayward-Smith V. J., Whitley I. M. The next release problem // *Information and Software Technology*. 2001. Т. 43. № 14. С. 883–890. (In Eng.). DOI: 10.1016/S0950-5849(01)00194-X.
13. Qassem D. Y., Al_saati N. A. A Solution to the Next Release Problem by Swarm Intelligence. *Technium // Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. 2023. Т. 12. С. 58–64. (In Eng.). DOI: 10.47577/technium.v12i.9439.
14. Panda A., at al. Empirical Validation of Neural Network Models for Agile Software Effort Estimation based on Story Points // *Procedia Computer Science*. 2015. Т. 57. С. 772–781. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.474.
15. Marner K., Wagner S., Ruhe G. Stakeholder identification for a structured release planning approach in the automotive domain // *Requirements Engineering*. 2022. Т. 27. С. 211–230. (In Eng.). DOI: 10.1007/s00766-021-00369-x.
6. Nigar N., Shahzad M., Islam Sh., Oki O., Lukose J. Multi-Objective Dynamic Software Project Scheduling: A Novel Approach to Handle Employee's Addition. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. pp.39792–39806. (In Eng.). DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3265716.
7. Minku L., Sudholt D., Yao Xi. Evolutionary Algorithms for the Project Scheduling Problem: Runtime Analysis and Improved Design. *GECCO'12. Proceedings of the 14th International Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. 2012. pp. 1221–1228. DOI: 10.1145/2330163.2330332.
8. Puntikov A. N., Shikov A. N. Algorithm for Dividing a Project into Batches with Flexible Planning Technologies. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2023. No. 4. pp. 81–91. (In Russ.). DOI: 10.17586/2713-1874-2023-4-81-91
9. Mougouei D., Powers D. Dependency-Aware Software Release Planning through Mining User Preferences. *Soft Computing*. 2020. Vol. 24. pp. 11673–11693. DOI: 10.1007/s00500-019-04630-y.
10. Van der Beek T., Souravlias D., van Essen J.T., Pruyn J., Aardal K. Hybrid Differential Evolution Algorithm for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with a Flexible Project Structure and Consumption and Production of Resources. *European Journal of Operational Research*. 2024. Vol. 313. No. 1. pp. 92–111. (In Eng.). DOI: 10.1016/j.ejor.2023.07.043.
11. Durillo J., at al. A Study of the Bi-Objective Next Release Problem. *Empirical Software Engineering*. 2011. Vol. 16. pp. 29–60. DOI: 10.1007/s10664-010-9147-3.
12. Bagnall A. J., Rayward-Smith V. J., Whitley I. M. The Next Release Problem. *Information and Software Technology*. 2001. Vol. 43. No. 14. pp. 883–890. DOI: 10.1016/S0950-5849(01)00194-X.
13. Qassem D. Y., Al_saati N. A. A Solution to the Next Release Problem by Swarm Intelligence. *Technium. Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. 2023. Vol. 12. pp. 58–64. DOI: 10.47577/technium.v12i.9439.
14. Panda A., at al. Empirical Validation of Neural Network Models for Agile Software Effort Estimation based on Story Points. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57. pp. 772–781. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.474.
15. Marner K., Wagner S., Ruhe G. Stakeholder Identification for a Structured Release Planning Approach in the Automotive Domain. *Requirements Engineering*. 2022. Vol. 27. pp. 211–230. DOI: 10.1007/s00766-021-00369-x.

Ардатовский Максим Игоревич / Ardatovsky Maksim I.

аспирант / graduate student

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: ardatovskym@gmail.com

Бессмертный Игорь Александрович / Bessmertny Igor A.

доктор технических наук, профессор / D.Sc, Professor

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: bessmertny@itmo.ru

Голубев Александр Андреевич / Golubev Aleksandr A.

аспирант / graduate student

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: 9459539@gmail.com

Голубева Антонина Станиславовна / Golubeva Antonina S.

аспирант / graduate student

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: astgolubeva@ya.ru

Горшков Петр Вениаминович / Gorshkov Petr V.

аспирант / graduate student

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

генеральный директор / General Manager

АО «Универсальная трейдинговая платформа» / JSC «Universal Trading Platform»

Санкт-Петербург, ул. Седова, д. 37, литер А

E-mail: vip@consultagency.ru

Гусарова Наталия Федоровна / Gusarova Natalia F.

кандидат технических наук, доцент / PhD, Associate Professor

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: nfgusarova@itmo.ru

Добренко Дмитрий Александрович / Dobrenko Dmitry A.

аспирант / graduate student

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: enotpalaskun@gmail.com

Иванов Сергей Евгеньевич / Ivanov Sergei E.

кандидат физико-математических наук, доцент / PhD, Associate Professor
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University
Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49
E-mail: serg_ie@mail.ru

Иванова Любовь Николаевна / Ivanova Lubov N.

старший преподаватель / senior lecturer
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» / Petersburg State
Marine Technical University (SMTU)
Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3
E-mail: 45is@mail.ru

Исаков Артем Олегович / Isakov Artem O.

аспирант / graduate student
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University
Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49
E-mail: aoisakov@itmo.ru

Лебедева Анна Сергеевна / Lebedeva Anna S.

кандидат экономических наук, доцент / PhD, Associate Professor
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» / Petersburg State
Marine Technical University (SMTU)
Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3
E-mail: aslebedeva11@gmail.com

Максимова Татьяна Геннадьевна / Maximova Tatiana G.

доктор экономических наук, профессор / D.Sc, Professor
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University
Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49
E-mail: tgmaximova@itmo.ru

Павлова Елена Александровна / Pavlova Elena A.

кандидат экономических наук, доцент / PhD, Associate Professor
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University
Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49
E-mail: eapavlova@itmo.ru

Сысоенко Мария Вячеславовна / Sysoenko Maria V.

аспирант / graduate student
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО» / ITMO University
Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49
E-mail: sysoenko.m@yandex.ru