

Том 17. №4. 2022

Июль–Август

Сквозной номер выпуска – 100

Университет «Синергия»

ISSN 1993-8314 (Print)

ISSN 2687-0649 (Online)

DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4

Научно-практический журнал «Прикладная информатика»

Журнал включен в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ****Главный редактор****Дли М. И.**, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой ИТЭУ, зам. директора филиала НИУ «МЭИ», г. Смоленск**Сопредседатели редакционного совета****Рубин Ю. Б.**, докт. экон. наук, профессор, чл.-корр. РАО, зав. кафедрой теории и практики конкуренции, Университет «Синергия», г. Москва**Мешалкин В. П.**, докт. техн. наук, профессор, академик РАН, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики, РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва**Члены редакционного совета****Батыршин И. З.**, д-р, профессор, Мексиканский нефтяной институт, приглашенный профессор Исследовательского вычислительного центра Национального политехнического института Мексики, г. Мехико, Мексика**Борисов В. В.**, докт. техн. наук, профессор, кафедра вычислительной техники, филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Смоленск**Брекис Эд.**, д-р, ассоциированный профессор, зав. кафедрой эконометрики и бизнес-информатики, Латвийский университет, г. Рига, Латвия**Волкова В. Н.**, докт. экон. наук, профессор, Институт компьютерных наук и технологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург**Козлов В. Н.**, докт. техн. наук, профессор, Институт компьютерных наук и технологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург**Краковский Ю. М.**, докт. техн. наук, профессор, кафедра информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск**Крейнович В. Я.**, д-р, профессор Университета Техаса, г. Эль-Пасо, США**Пецольдт К.**, д-р, профессор, проректор по международному сотрудничеству с Восточной Европой, Технологический университет, г. Ильменау, Германия**Росс Г. В.**, докт. техн. наук, докт. экон. наук, профессор, академик РАН, научная лаборатория семантического анализа и интеграции, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, г. Москва**Стоянова О. В.**, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой информационных систем в экономике, СПбГУ, г. Санкт-Петербург**Сухомлин В. А.**, докт. техн. наук, профессор, зав. лабораторией открытых информационных технологий, факультет ВМК, МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва**Халин В. Г.**, докт. экон. наук, профессор, кафедра информационных систем в экономике, экономический факультет СПбГУ, г. Санкт-Петербург**Шориков А. Ф.**, докт. физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург**Штельцер Д.**, д-р, rer. pol., профессор, глава департамента информации и управления знаниями, Технологический университет, г. Ильменау, Тюрингия, Германия**Юсупов Р. М.**, докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, научный руководитель Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, президент Национального общества имитационного моделирования «НОИМ», г. Санкт-Петербург**Заместители главного редактора****Прокимов Н. Н.**, канд. техн. наук, доцент, департамент цифровой экономики, Университет «Синергия», г. Москва**Власова Е. А.**, научная редакция Университета «Синергия», г. Москва

Журнал выходит с 2006 г. Периодичность издания – 6 раз в год.

Журнал индексируется в российских и зарубежных базах научной периодики eLIBRARY (РИНЦ), Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science, ВИНТИ, Ulrich's Periodicals Directory

**Учредитель и издатель: Негосударственное образовательное частное учреждение высшего образования  
Университет «Синергия»**

Адрес редакции и издателя:

129090, Москва, ул. Мещанская, д. 9/14, стр. 1 (юр.ид.)

125190, Москва, Ленинградский пр-т, д. 80, корпус Г

Тел.: +7 (495) 987-43-74 (доб. 33-04); e-mail: evlasova@synergy.ru; www.appliedinformatics.ru

© Университет «Синергия»

# Journal of Applied INFORM@TICS

Peer-reviewed scientific journal

Vol. 17. No. 4. 2022

July–August

Continuous issue – 100

Synergy University

ISSN 1993-8314 (Print)

ISSN 2687-0649 (Online)

DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4

Peer-reviewed scientific journal "Journal of Applied Informatics"

## EDITORIAL BOARD

### Editor-in-Chief

**M. Dli**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the ITEM Chair, Deputy Director of the National Research University MPEI Branch, the city of Smolensk

### Co-Chairs of the Editorial Board

**Yu. Rubin**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Corresponding Member of the Russian Education Academy, Head of the Theory and Practice of Competition Chair, Moscow University for Industry and Finance "Synergy", the city of Moscow

**V. Meshalkin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences (RAS), Director of the International Institute of Logistics and Resource Technology Innovation, D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, the city of Moscow

### Members of the Editorial Board

**I. Batyrshin**, Dr. Sci. (Habilitation), IFSA Fellow, Titular Professor C, Centro de Investigacion en Computacion, Instituto Politecnico Nacional, the city of Mexico, United Mexican States

**V. Borisov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Computer Science Department, National Research University MPEI Branch, the city of Smolensk

**Ed. Brēķis**, Dr. oec., Assoc. Professor, Head of the Econometrics and Business Informatics Chair, Faculty of Economics and Management, University of Latvia, the city of Riga, Latvia

**V. Khalin**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Economic Information Systems Department, St. Petersburg State University, the city of St. Petersburg

**V. Kozlov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Computer Science and Technology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, the city of St. Petersburg

**Yu. Krakovskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Information Systems and Information Security Department, Irkutsk State Railway Transport Engineering University, the city of Irkutsk

**V. Kreinovich**, PhD, Professor of Computer Science, University of Texas at El Paso, USA

**K. Pezoldt**, Dr. oec. habil., Professor, Deputy Rector for International Cooperation with Eastern Europe, Ilmenau University of Technology, the city of Ilmenau, Germany

**G. Ross**, Dr. Sci. (Eng.), Dr. of Economics, Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences (RANS), Research Laboratory of Semantic Analysis and Integration, Plekhanov Russian University of Economics, the city of Moscow

**A. Shorikov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Leading Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, the city of Ekaterinburg

**O. Stoyanova**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Economic Information Systems Department, St. Petersburg State University, the city of St. Petersburg

**V. Sukhomlin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University, the city of Moscow

**D. Stelzer**, Dr., rer. pol., Professor, Head of the Information and Knowledge Management Department of Ilmenau University of Technology, the city of Ilmenau, Germany

**V. Volkova**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Institute of Computer Science and Technology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, the city of St. Petersburg

**R. Yusupov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences (RAS), Scientific Leader of the Saint Petersburg RAS Institute of Informatics and Automation, President of NC "National Society for Simulation Modeling", the city of St. Petersburg

### Deputy Chief Editors

**N. Prokimnov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Digital Economy Department, Moscow University for Industry and Finance "Synergy", the city of Moscow

**E. Vlasova**, Scientific Edition Department, Moscow University for Industry and Finance "Synergy", the city of Moscow

Published since 2006. Periodicity: bimonthly.

The journal is indexed in

Russian Science Citation Index (RSCI) on Web of Science platform,  
VINITI (Russian Academy of Sciences), Ulrich's Periodicals Directory

**Publisher: Moscow University for Industry and Finance «Synergy»**

Publisher address: 9/14 s. 1, Meshchanskaya st., Moscow, 129090, Russia

Editorial office address: 80G, Leningradskiy Avenue, Moscow, 125190, Russia

Tel: +7 (495) 987-43-74 (ext. 33-04); e-mail: [evlasova@synergy.ru](mailto:evlasova@synergy.ru); [www.appliedinformatics.ru](http://www.appliedinformatics.ru)

© Synergy University

**ИТ-МЕНЕДЖМЕНТ**

**Управление эффективностью**

*А. В. Кычкин, О. В. Горшков, М. А. Кукаркин*  
Интеграция предиктивно-аналитических моделей с IoT-платформой цифрового экомониторинга . . . . . 5

*М. В. Забоев, В. Г. Халин, Г. В. Чернова, А. В. Юрков*  
Интеллектуальный анализ данных в управлении российской высшей школой. . . . . 17

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА**

**Модели и методики**

*Г. В. Рыбина, В. Ю. Степаньков*  
Моделирование взаимодействия интеллектуальных агентов в мультиагентной системе управления городским парковочным пространством . . . . . 37

*А. Е. Трубин, А. А. Морозов, А. Е. Зубанова, В. А. Ожередов, В. С. Корепанова*  
Методика предобработки данных машинного обучения для решения задач компьютерного зрения . . . . . 47

**Эффективные алгоритмы**

*С. С. Голубев, А. Л. Афанасьев, А. В. Курицын*  
Применение технологий искусственного интеллекта в научно-технологическом прогнозировании . . . . . 57

*М. С. Пестин, А. С. Новиков*  
Имитационная модель беспроводной ad-hoc сети для исследования алгоритмов маршрутизации трафика . . . . . 75

**ИТ И ОБРАЗОВАНИЕ**

**Образовательное пространство**

*Т. А. Шкодина*  
Разработка архитектуры рекомендательной системы по выбору онлайн-курсов. . . . . 87

**ЛАБОРАТОРИЯ**

**Моделирование процессов и систем**

*А. Ф. Шорилов*  
Прогнозирование и минимаксное оценивание состояний производственной системы при наличии рисков . . . . . 97

*В. В. Борисов, А. М. Соколов, А. П. Жарков, О. П. Култыгин*  
Решение обратной задачи кинематики для последовательных роботов-манипуляторов на основе нечетких численных методов. . . . . 113

*А. В. Полбин, М. А. Кропачева*  
Моделирование зависимости обменного курса рубля от цен на нефть с использованием нейронных сетей. . . . . 127

**IT MANAGEMENT**

**Performance management**

*A. Kychkin, O. Gorshkov, M. Kukarkin*  
 Predictive models integration with an environmental monitoring IoT platform . . . . . 5

*M. Zaboev, V. Khalin, G. Chernova, A. Yurkov*  
 Data mining in the management of the Russian higher school . . . . . 17

**TOOLS**

**Models and methods**

*G. Rybina, V. Stepankov*  
 The simulation of intelligent agents communication in the multi-agent management system for urban parking space . . . . . 37

*A. Trubin, A. Morozov, A. Zubanova, V. Ozheredov, V. Korepanova*  
 The method of preprocessing machine learning data for solving computer vision problems . . . . . 47

**Algorithmic efficiency**

*S. Golubev, A. Afanasiev, A. Kuritsyn*  
 The use of artificial intelligence technologies for scientific and technological forecasting . . . . . 57

*M. Pestin, A. Novikov*

Simulation model of wireless ad-hoc network to study algorithms of traffic routing . . . . . 75

**IT AND EDUCATION**

**Educational environment**

*T. Shkodina*  
 Development of the architecture of a recommendation system for choosing online courses . . . . . 87

**LABORATORY**

**Processes and systems modeling**

*A. Shorikov*  
 Prediction and minimax estimation of the production system in the presence of risks . . . . . 97

*V. Borisov, A. Sokolov, A. Zharkov, O. Kuliygin*  
 Solving the inverse kinematics problem for sequential robot manipulators based on fuzzy numerical methods . . . . . 113

*A. Polbin, M. Kropocheva*  
 Modeling the relationship between the Russian ruble exchange rate and oil prices using artificial neural networks . . . . . 127

# Интеграция предиктивно-аналитических моделей с IoT-платформой цифрового экомониторинга

А. В. Кычкин<sup>1\*</sup>, О. В. Горшков<sup>1</sup>, М. А. Кукаркин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Пермь, Россия  
\*avkychkin@hse.ru

**Аннотация.** Исследование направлено на развитие прикладных программных систем для автоматизированного мониторинга окружающей среды. Рассматривается задача по разработке и интеграции прикладного программного обеспечения, в частности расчетно-аналитических моделей на основе методов машинного обучения (ML), с IoT-платформой цифрового экомониторинга для промышленных предприятий. Такая платформа используется для создания программно-аппаратных систем класса CEMS – Continuous Emissions Monitoring System, предназначенных для непрерывного контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух на производствах. Использование ML-инструментов, интегрированных с платформой, позволяет значительно расширить функциональность существующих CEMS, в частности оперативно конструировать новые SaaS-сервисы для прогнозирования динамики распространения загрязнений. С учетом высоких требований к промышленным системам возникает необходимость создания специализированного программного продукта – аналитического сервера, реализующего управление подключаемыми предиктивно-аналитическими ML-моделями с требуемым уровнем качества обслуживания, в том числе автоматической инициализацией новых аналитических скриптов в виде классов, изолированностью отдельных компонентов, автоматическим восстановлением после возникновения сбоев, защищенностью и безопасностью данных. В статье предложена схема функционально-алгоритмического взаимодействия IoT-платформы цифрового экомониторинга и аналитического сервера. Представленный вариант реализации аналитического сервера имеет иерархическую структуру, в вершине которой стоит приложение, способное принимать высокоуровневые REST-запросы на инициализацию расчетов в реальном времени. Данный подход позволяет минимизировать влияние одного аналитического скрипта (класса) на другой, а также расширять функциональность платформы в «горячем» режиме, то есть без остановки или перезагрузки. Приведены результаты, демонстрирующие автоматическую инициализацию и подключение базовых ML-моделей для прогнозирования концентраций вредных веществ.

**Ключевые слова:** CEMS, системная архитектура, платформа Интернета вещей, аналитический сервер, машинное обучение

**Для цитирования:** Кычкин А. В., Горшков О. В., Кукаркин М. А. Интеграция предиктивно-аналитических моделей с IoT-платформой цифрового экомониторинга // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 5–16. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-5-16

# Predictive models integration with an environmental monitoring IoT platform

A. Kychkin<sup>1\*</sup>, O. Gorshkov<sup>1</sup>, M. Kukarkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia

\* avkychkin@hse.ru

**Abstract.** The research focuses on the development of applied software systems for automated environmental monitoring. The task of developing and integrating applied software, in particular calculation and analytical models based on machine learning (ML) methods, with an IoT platform of digital eco-monitoring for industrial enterprises is considered. Such a platform is used to create software and hardware systems of CEMS – Continuous Emissions Monitoring System class, designed for continuous monitoring of pollutant emissions into the atmospheric air at production facilities. Use of ML tools integrated with the platform allows to expand significantly the functionality of the existing CEMS, in particular to quickly build new SaaS services for forecasting the dynamics of pollution distribution. Given the high requirements for industrial systems, there is a need to create a specialized software product – an analytical server that implements the management of connected predictive analytical ML models with the required level of service quality, including automatic initialization of new analytical scripts as classes, isolation of individual components, automatic recovery after failures, data security and safety. The paper proposes a scheme of functional and algorithmic interaction between the IoT platform of digital eco-monitoring and the analytical server. The proposed implementation of the analytical server has a hierarchical structure, at the top of which is an application capable of accepting high-level REST requests to initialize calculations in real time. This approach minimizes the impact of one analytical script (class) on another, as well as extending the functionality of the platform in "hot" mode, that is, without stopping or reloading. Results demonstrating automatic initialization and connection of basic ML models for predicting pollutant concentrations are presented.

**Keywords:** CEMS, system architecture, Internet of Things platform, analytical server, machine learning

**For citation:** Kychkin A., Gorshkov O., Kukarkin M. Predictive models integration with an environmental monitoring IoT platform. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.5-16 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-5-16

## Введение

Для контроля качества атмосферного воздуха на промышленных предприятиях применяются программно-аппаратные системы класса CEMS (Continuous Emissions Monitoring System). Такие системы измеряют концентрации загрязняющих веществ, сохраняют данные в формате временных рядов, формируют отчеты для экологов, руководства предприятий и контролирующих органов [1]. Программное обеспечение (ПО) CEMS ориентировано на работу в непрерывном (online) режиме, что связано с высокой ди-

намикой воздушной среды, состояние которой постоянно изменяется по времени.

Известно, что интенсивность и состав выбросов зависят от параметров самих источников выбросов, ландшафта, метеоусловий, наличия смежной энергетической инфраструктуры, транспортных магистралей и других факторов [2, 3]. На территории крупных производств с большим числом источников, а также вокруг предприятий, находящихся рядом с жилой застройкой, контроль загрязнений многократно усложняется за счет обеспечения прогнозирования распространений выбросов. В случае обнаружения риска опасных концен-

траций актуальной задачей становится заблаговременное определение потенциального источника загрязнения. Возникает потребность в развитии текущей функциональности СЕМС за счет интеллектуального анализа данных и машинного обучения [4–6].

СЕМС либо являются самостоятельными ИТ-продуктами, либо могут быть созданы на базе специализированных вертикально-ориентированных платформ Интернета вещей (IoT) [7, 8]. В случае реализации СЕМС на базе IoT-платформы разработчики получают более широкие возможности по интеграции датчиков, пользовательских АРМ, включающих средства визуализации данных и ГИС-модули, методов машинного обучения (ML) [9]. Актуальной задачей становится создание платформенно-независимого аналитического сервера, который мог бы оперативно подключаться к существующим цифровым решениям и платформам и при этом обеспечивать оперативное исполнение необходимых предиктивных аналитик и идентификации источников выбросов. Рассматриваемые расчетно-аналитические возможности прикладного ПО для СЕМС будут способствовать созданию цифровых IoT/ML-сервисов, что соответствует концепции Индустрии 4.0 и Стратегии социально-экономического развития РФ в части снижения уровня выбросов парниковых газов до 2050 года, описанной в распоряжении Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р.

### **Схема функционально-алгоритмического взаимодействия IoT-платформы цифрового экомониторинга и аналитического сервера**

Предлагается следующий алгоритм работы СЕМС на базе типовой IoT-платформы цифрового экомониторинга с интегрированным аналитическим сервером:

1. Установка измерительных IoT-устройств. На территории предприятия, на гра-

нице его соприкосновения с санитарной зоной, на границе с жилой зоной устанавливаются по периметру и внутри специальные приборы-газоанализаторы с поддержкой IoT-протоколов, например MQTT, FTP или HTTP API [10]. Эти устройства измеряют в реальном времени концентрации загрязняющих веществ ( $\text{мг}/\text{м}^3$ , г/с, т/год), например  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ .

2. Развертывание платформы экомониторинга. Газоанализаторы подключаются к серверу платформы экомониторинга, который может быть размещен в глобальной сети Интернет или на сервере в локальной сети предприятия [11]. Платформа экомониторинга является веб-ориентированным программным обеспечением с разделением на слои представления, бизнес-логики и данных. Доступ сотрудников предприятия и специалистов экологических служб реализуется по LAN/WAN через браузер.

3. Создание сервиса. На платформе из виджетов создаются и настраиваются панели управления (дашборды), которые будут использоваться для оперативной оценки экологической обстановки на контролируемой территории промышленного предприятия на основе данных измерений, актуальных данных о параметрах стационарных и залповых выбросов загрязняющих веществ и результатов предиктивного анализа процессов переноса загрязнений в окружающей среде по воздуху.

4. Опытная эксплуатация платформы в части реализации функций сбора, анализа и передачи данных с IoT-устройств. Производится накопление информации о состоянии выбросов, критических значениях показателей вредных веществ, их периодичности и общей статистики. На основе накопленной информации строятся прогнозы экологической динамики на основании методов машинного обучения [12]. При необходимости производится доработка предиктивной модели для оценки изменений состояния атмосферного воздуха промышленных предприятий по данным с газоанализаторов. Для формирова-

ния автоматических рекомендаций (команд управления) для промышленного предприятия по оптимизации выбросов могут быть использованы сценарии. Формируются рекомендации по минимизации рисков загрязнений с учетом общей динамики экологической обстановки по воздуху.

5. Управление выбросами в атмосферный воздух на промышленном предприятии. Полученные в п. 4 рекомендации должны быть внесены в блоки сценариев, которые работают по принципу дискретного автомата с логическим выводом управляющих сигналов на сигнальную (аварийная сигнализация) и регулируемую аппаратуру промышленного предприятия. На этом этапе формируемые сигналы, извещающие о критических значениях выбросов, могут быть переданы также в SCADA- или MES-системы для последующей обработки управляющей аппаратурой. Это может быть реализовано по протоколу

Modbus TCP, который поддерживается большинством SCADA. В результате выполнения данного этапа алгоритма в системе управления технологическим процессом будет создан дополнительный контур обратной связи по экологическому фактору. Это позволит определить наиболее безопасные с экологической точки зрения режимы работы предприятия, прогнозировать изменение режимов в динамике и учитывать географические данные распространения выбросов.

С учетом приведенного выше алгоритма работы построена целевая архитектура IoT-платформы с выделенным аналитическим блоком (рис. 1).

Архитектура включает в себя следующие блоки:

1) Connectivity Management – блок взаимодействия с внешними устройствами. Данный блок реализует коммуникацию с оборудованием в режиме реального времени. К числу

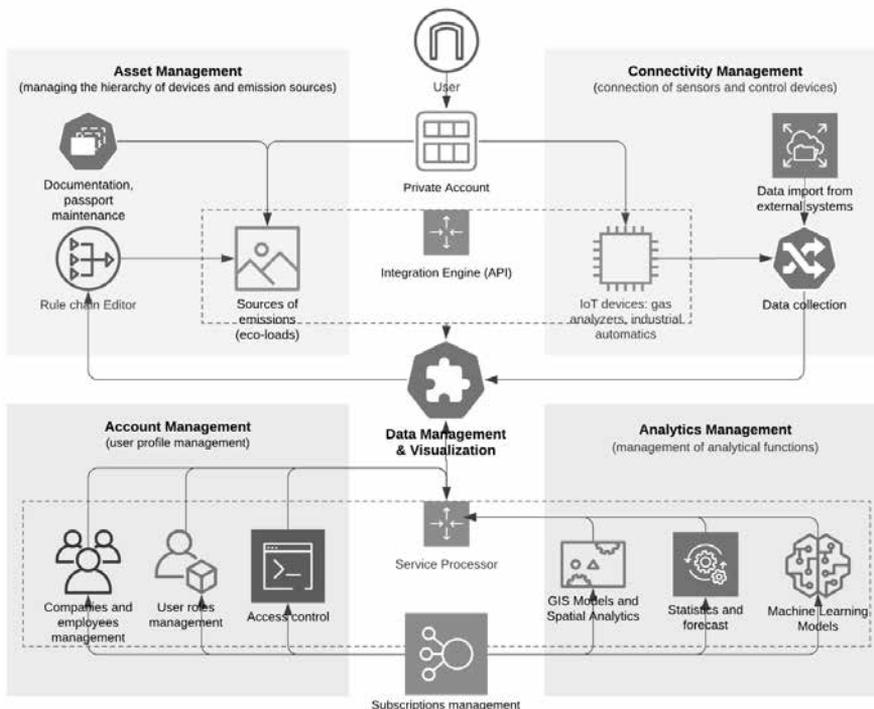


Рис. 1. Архитектура IoT-платформы для мониторинга выбросов промышленного предприятия в атмосферный воздух

Fig. 1. IoT-platform architecture for the industrial air emissions monitoring

такого оборудования относятся измерительные устройства, в том числе газоанализаторы и умные датчики, различные программируемые контроллеры. Блок позволяет подключать устройства, передающие информацию по протоколам MQTT и Modbus. В данном блоке реализованы функции сбора и долгосрочного хранения данных, а также управления. При этом управление может осуществляться как в ручном режиме, путем задания каких-либо управляющих воздействий, так и в автоматическом, например на основе заложенных сценариев или в зависимости от внештатных событий. Все собранные данные записываются в базу данных временных рядов InfluxDB, это позволяет быстрее осуществлять чтение и запись данных по сравнению с традиционной реляционной СУБД [13].

2) Asset Management – блок управления промышленными и инфраструктурными объектами. Данный блок обеспечивает хранение пользовательской и технической информации об объектах, которые участвуют в измерительно-аналитической деятельности платформы. К таким объектам могут относиться предприятия, отдельные источники выбросов, участки технологических производств или целые районы. Блок поддерживает ведение документации, паспортизацию, создание вложенных (иерархических) структур экологических нагрузок, создание и привязку сценариев управления к эконогрузкам.

3) Account Management – блок управления пользовательскими аккаунтами. Данный блок включает в себя функции аутентификации и авторизации, распределения прав между различными уровнями пользователей. Блок реализован благодаря авторизации с помощью JSON WebToken на основе стандарта RFC 7519. При этом пароли пользователей хранятся в зашифрованном виде, а передача пользовательских данных между компонентами система осуществляется по защищенному протоколу с использованием SSL-сертификата. Управление ролями пользователей основа-

но на предоставлении их аккаунтам привилегий доступа к модулям и данным.

4) Analytics Management – аналитический блок. Представляет собой совокупность встроенных в СУБД агрегатных и простейших статистических функций и аналитический сервер. Сервер аналитики поддерживает динамическое подключение различных вычислительных модулей, осуществляющих более сложные математические операции с использованием алгоритмов машинного обучения, реализованных на языке программирования Python.

5) Data Management & Visualization – интеграционный блок визуализации и управления данными. Этот блок является связующим для остальных блоков. Он обеспечивает отображение на экран результатов сбора данных, аналитики, в том числе результатов статистических и прогнозных функций. Результат сбора данных может быть отображен в режиме реального времени (с частотой обновления от 1 с). Блок позволяет создавать пользовательские страницы с виджетами, представляющие собой графики, диаграммы и таблицы.

Блоки системы реализованы с использованием принципа контейнеризации. Каждый блок помещен в отдельный docker-контейнер, между собой контейнеры связаны с помощью механизма docker-compose. Это позволяет равномерно распределять нагрузку между приложениями, а также повышает стабильность системы. При сбоях в каком-либо блоке не будет оказываться влияние на другие [14].

## Схема интеграции моделей машинного обучения в IoT-платформу

Для реализации целевой архитектуры в части подключения расчетно-аналитических моделей, в частности моделей машинного обучения, предлагается выделить отдельный аналитический сервер, выполненный в виде программного микросервиса (рис. 2).

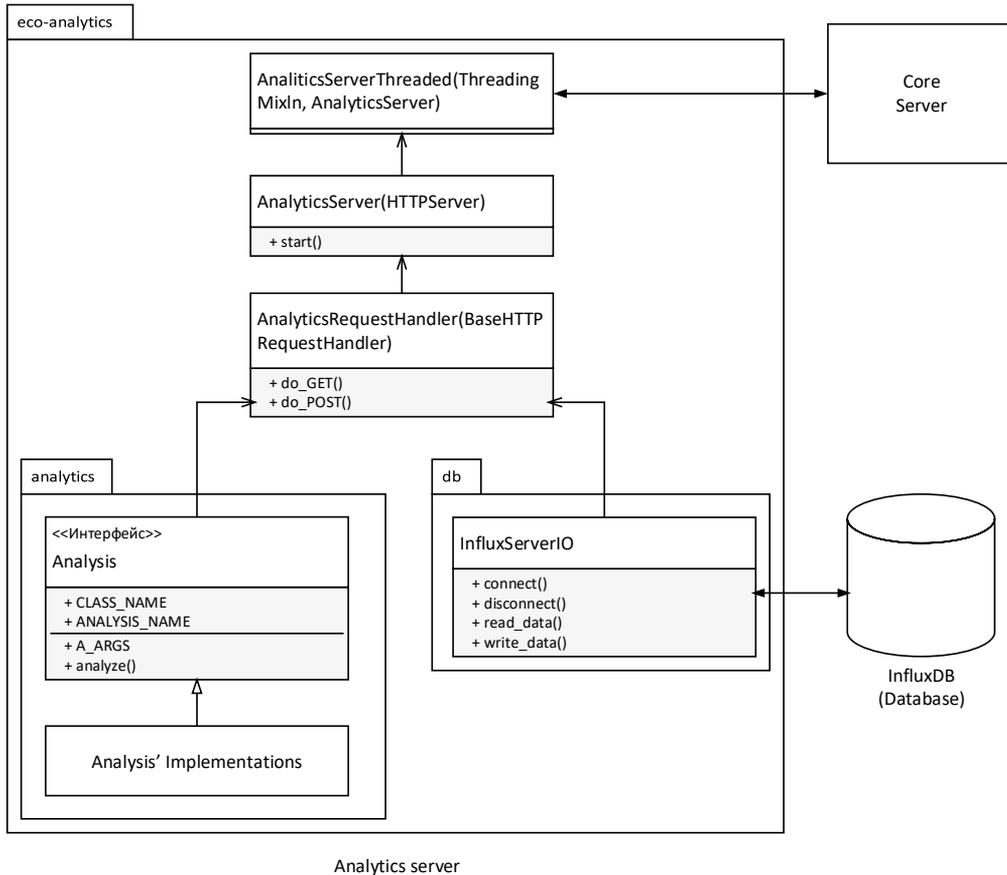


Рис. 2. Упрощенная сервисная модель «запрос – ответ»  
 Fig. 2. Simplified demand response service model

Аналитический сервер представляет собой многопоточное приложение, которое является независимым от других компонентов платформы и взаимодействует с остальными блоками предлагаемой архитектуры посредством запросов через зашифрованный протокол HTTPS. Коммуникация осуществляется через протокол, построенный на основе REST API. Каждая аналитическая функция, включая прогнозирование рассеивания выбросов, представляет собой отдельный скрипт, выполненный в виде класса. Отличительной особенностью является изолированность каждого скрипта друг от друга, что позволяет динамически подключать новые аналитики, изменять уже внедренные. Такая организация аналитического сервера обеспечивает повышенную стабильность работы всей IoT-платформы

и создаваемых на ее основе CEMS-систем; собой (зависание) в одном из расчетных компонентов не влияет на остальные.

Основной программный блок, отвечающий за коммуникацию с базой данных, интеграцию по API и загрузку аналитических скриптов, построен по принципу объектно-ориентированного программирования и разделен на классы.

AnalyticsServerThreaded – коннектор для многопоточности сервера, использует стандартный класс для многопоточности ThreadingMixIn. Многопоточность позволяет выполнять несколько запросов одновременно. Это может быть полезно при длительном прогнозировании. В данном случае выполнение прогноза одного пользователя не будет влиять на работу с системой другого.

`AnalyticsServer` – инициализирующий класс. Осуществляет начальную установку параметров запуска, устанавливает адрес и порт, открывает и закрывает соединение.

`AnalyticsRequestHandler` – класс, отвечающий за обработку запросов. Взаимодействие через GET-запросы осуществляется для получения служебной информации, а через POST-запросы – для запроса и получения результата аналитических функций. Формат передаваемых сообщений посредством POST-запроса – JSON.

`InfluxServerIO` – класс, отвечающий за взаимодействие с базой данных временных рядов `InfluxDB`. Использует набор методов `DataFrameClient` из библиотеки `influxdb`. Осуществляет установку и закрытие соединения, считывание и запись информации.

Аналитические скрипты имеют строгую структуру. В качестве входных и выходных данных выступает объект `DataFrame`. При этом в качестве индекса выступает временная метка.

Должно быть указано описание, состоящее из следующих блоков:

`CLASS_NAME` – класс скрипта, именно таким именем необходимо назвать класс далее;

`ANALYSIS_NAME` – name, должно совпадать с name из имени файла;

`A_ARGS` – аргументы, которые задаются при POST-запросе. В данном случае являются описательными, используются при интеграции с платформой.

## Реализация и тестирование интеграции предиктивных моделей машинного обучения в IoT-платформу

Тестирование аналитического сервера проводилось на платформе *ecomonitoring.io* компании ООО «Цифровой экомониторинг». В ходе испытаний использовался сервер с установленным 12-ядерным процессором CPU Intel® Xeon® E5-2670 v3, обладающим тактовой частотой 2,3 ГГц на одно ядро. При

экспериментах было задействовано только одно вычислительное ядро CPU.

Представленная на рисунке 1 архитектура подразумевает размещение каждого компонента в отдельный контейнер, что реализовано в *ecomonitoring.io* с помощью технологий `docker`, `docker-compose`, `nginx`, `kubernetes` и других. Преимущество подхода заключается в том, что каждая подсистема является автономной от основной операционной системы и остальных компонентов. Между компонентами выстраивается сеть для взаимодействия, но при этом они не используют программный код друг друга. Аналитический сервер был также вынесен в отдельный контейнер. Абстрагирование компонентов друг от друга заметно увеличило стабильность платформы, например при отключении аналитического сервера остальные блоки сохранили работоспособность.

Аналитический сервер реализует поддержку созданных на языке программирования Python скриптов для обработки временных рядов, включая расчет статистических характеристик. При этом он поддерживает возможность исполнения алгоритмов, основанных на классическом машинном обучении, а также различных внешних расчетных моделей, имеющих свои API [15, 16]. Статистические методы позволяют осуществлять простейшие операции с временными рядами для их сравнения и анализа, например поиск минимальных и максимальных значений, среднего значения, медианы, моды, разброса значений и др. Блок предиктивных аналитик предназначен для краткосрочного прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [4–9, 12, 15, 16]. Прогнозирование низкой вычислительной сложности включает в себя методы на основе базовой линии, которая строит профиль концентрации вредных веществ с учетом усреднений за предыдущие несколько дней, идущих последовательно; авторегрессии и модели SARIMA; тройного экспоненциального сглаживания Хольта – Винтерса,

выделяющего в структуре данных сложившийся тренд и сезонность.

Аналитический сервер имеет API, все запросы которого осуществляются по защищенному протоколу HTTPS. Кроме того, аналитические методы могут использовать данные, получаемые от внешних источников данных (сервисов). К таким сервисам могут относиться различные метеорологические службы, АСУ предприятий, системы дистанционного зондирования. Обращение к одиночным моделям по API позволяет составлять ансамбли, которые, как правило, обладают более высокой точностью. При этом составление ансамблей не требует перекомпиляции аналитического скрипта, что существенно сокращает время сопровождения.

Испытания включили в себя следующие этапы:

1. На языке Python разработан аналитический скрипт Ndays, реализующий алгоритм прогнозирования на основе базовой линии, согласно поддерживаемому шаблону.

2. Скрипт Ndays.py был загружен в директорию аналитического сервера платформы *ecomonitoring.io*. Сервер автоматически сканирует директорию со скриптами и инициализирует новый аналитический класс.

3. Пользователь в рамках своего личного кабинета создал дашборд с визуализацией графика концентраций вредных веществ.

4. В меню вызова аналитических функций на виджете графика пользователь выбрал автоматически появившийся алгоритм прогнозирования Ndays. При вызове функции потребовалось ввести дату для составления прогноза.

5. Блок визуализации и управления данными платформы сформировал запрос на вызов аналитической функции с помощью запроса REST API.

6. Аналитический сервер принял запрос от блока визуализации и управления данными, заново просканировал директорию со скриптами и запустил необходимый аналитический класс. Если программа содержит ошибку, то ее запуск становится невозможным и сервер возвращает информацию о неполадке.

7. После успешного выполнения расчета скрипт вернул результат на аналитический сервер, который передал данные на блок визуализации и управления данными платформы.

8. После исполнения функции на виджете графика выведен результат расчетов в виде линии  $F(x)$ : *analysis-prediction-ndays* (рис. 3).

9. Аналогичным образом протестированы аналитические скрипты со статистическими расчетами, а также прогнозные ML-модели *Sarima.py*, *Holt-Winters.py*.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов со статистическими и прогностическими моделями были установ-

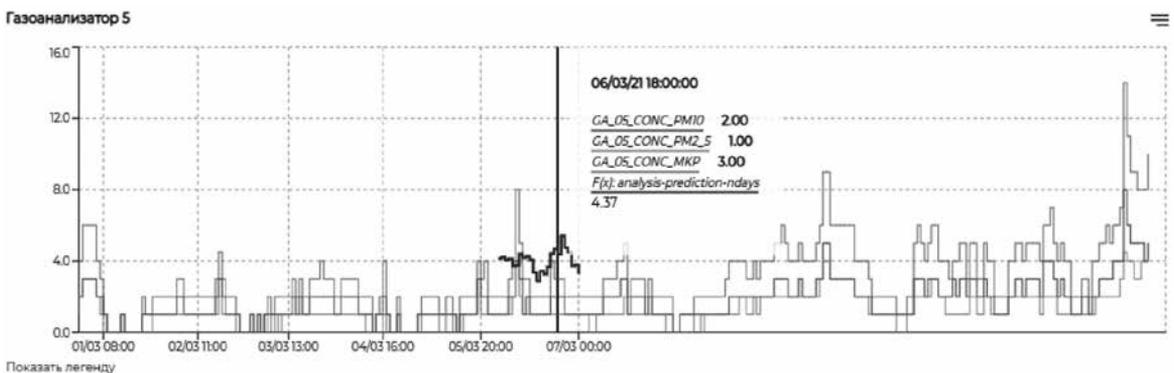


Рис. 3. Результат работы подключенной аналитики Ndays.py

Fig. 3. Result of the data processing by integrated Ndays.py

лены ключевые преимущества предлагаемой схемы взаимодействия IoT-платформы цифрового экологического мониторинга и аналитического сервера, предоставляющие подключаемым предиктивно-аналитическим ML-моделям требуемый для экологов промышленных предприятий уровень качества обслуживания:

- автоматическая инициализация новых аналитических скриптов в виде классов;
- изолированность отдельных компонентов;
- автоматическое восстановление после возникновения сбоев;
- защищенность и безопасность данных.

При развертывании аналитического сервера в высоконагруженной вычислительной инфраструктуре предприятия рекомендуется его масштабировать путем разнесения в разные контейнеры, исполняемые на физически разных вычислительных машинах. Для обеспечения равномерности распределения нагрузки между контейнерами следует применить балансировщик.

Важным преимуществом предложенного сервера является способность к автоматическому восстановлению после сбоев. Это устанавливается индивидуально для каждого отдельного контейнера платформы. Автоматическое восстановление можно задать с помощью возможностей операционной системы или средств контейнеризации. Способность автоматического восстановления позволяет сократить время обслуживания платформы во время системных сбоев, например при перебоях на сетевом уровне или обесточивании серверного оборудования.

Архитектура аналитического сервера, представленная в работе, позволяет значительно обезопасить пользовательские данные за счет следующих факторов:

1. Информация с измерениями между аналитическими скриптами, блоком визуализации и управления передается с помощью общей базы данных временных рядов. В запросах указывается только тип скрипта (модели) и параметры, а возвращается статус выполне-

ния программы. Сама же информация считывается из базы данных каждым блоком индивидуально.

2. Для передачи REST-запросов используется защищенный HTTPS-протокол, который поддерживает шифрование посредством криптографических протоколов SSL и TLS.

3. Все управляющие запросы, которые несут в себе важную информацию, передаются с помощью запроса POST. Данный тип запроса не сохраняется в истории браузера пользователей и не кэшируется.

4. Передача данных между контейнерами реализуется только в рамках защищенной корпоративной сети. При реализации контейнеров платформы *ecomonitoring.io* использована внутренняя сеть, недоступная извне.

## Заключение

Несмотря на то, что мировой опыт показывает бурное развитие цифровых технологий в части IoT-платформ со встроенными ML-моделями, представленная научно-техническая разработка предлагает альтернативный вариант, основанный на упрощенной интеграции пользовательских аналитик. Это особенно актуально для задач экологического мониторинга, где по-прежнему решается задача эмпирического установления наилучших прогнозных техник, в отличие от других предметных областей, где взаимосвязи между данными более хорошо изучены [17, 18].

В работе приведены результаты интеграции расчетно-аналитических моделей на основе ML с IoT-платформой цифрового экомониторинга для промышленных предприятий. В ходе тестирования были подключены модели, реализованные на языке Python, в том числе модель на основе базовых линий (Ndays), авторегрессионная модель (SARIMA), модель тройного экспоненциального сглаживания (Holt-Winters). Интеграция моделей в состав IoT-платформы произведена с помощью API, который подключается к СУБД временных рядов InfluxDB.

Предложенный вариант реализации аналитического блока имеет иерархическую структуру, во главе которой стоит аналитический сервер – приложение, способное принимать внешние пользовательские запросы в реальном времени. Предложенный сервер представляет подключаемым предиктивно-аналитическим ML-моделям требуемый для экологов промышленных предприятий уровень качества обслуживания, в том числе автоматическую инициализацию новых аналитических скриптов в виде классов, изолированность отдельных компонентов, автоматическое восстановление после возникновения сбоев, защищенность и безопасность данных. Преимуществом данного подхода является минимизация влияния одного скрипта на другой, а также возможность расширения

функциональности продукта в «горячем» режиме, то есть без остановки и перезагрузки всей платформы.

С технико-экономической точки зрения эффективность использования предложенного аналитического сервера высокая, поскольку время интеграции моделей максимально сокращено за счет применения технологий контейнеризации. Для работы аналитического сервера в составе IoT-платформы предприятие может либо использовать собственные локальные сервера, либо работать с внешним хостингом. Созданный аналитический сервер рекомендуется для использования в качестве ИТ-средства поддержки задач эколога, поскольку он позволит пользователям оперативно подключать новые модели прогнозирования и строить на их основе комбинации – ансамбли.

#### Список литературы

1. *Fan X., Zheng H.* Design CEMS for flue gas from thermal power plant // Proceeding of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2009. P. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918261.
2. *Jeong S. J.* CALPUFF and AERMOD dispersion models for estimating odor emissions from industrial complex area sources // Asian Journal of Atmospheric Environment. 2011. Vol. 5. No. 1. P. 1–7. DOI: 10.5572/ajae.2011.5.1.001.
3. *Van Dingenen R. et al.* TM5-FASST: a global atmospheric source-receptor model for rapid impact analysis of emission changes on air quality and short-lived climate pollutants // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. Vol. 18. No. 21. P. 16173–16211. DOI: 10.5194/acp-18-16173-2018.
4. *Liu H., Li Q., Yu D., Gu Yu.* Air quality index and air pollutant concentration prediction based on machine learning algorithms // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 19. Article 4069. DOI: 10.3390/app9194069.
5. *Akhtar A., Masood S., Gupta Ch., Masood A.* Prediction and analysis of pollution levels in Delhi using multilayer perceptron. – In: Data Engineering and Intelligent Computing. – Singapore: Springer, 2018. No. 542. P. 563–572. DOI: 10.1007/978-981-10-3223-3\_54.
6. *Shaban K., Kadri A., Rezk E.* Urban air pollution monitoring system with forecasting models // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16. No. 8. P. 2598–2606. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2514378.
7. *Dhingra S., Babu M. R., Gandomi A. H., Ratan R.* Internet of Things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair) // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 5577–5584. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2903821.
8. *Arévalo F., Ibrahim M. T., Diprasetya R. M., Flores-Cortez O. O., Schwung A.* Monitoring and forecasting of air emissions with IoT measuring stations and a SaaS cloud application // Proceeding of the 2nd International Conference on Societal Automation (SA). 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/SA51175.2021.9507127.
9. *Toma C., Alexandru A., Popa M., Zamfiroiu A.* IoT solution for smart cities' pollution monitoring and the security challenges // Sensors. 2019. Vol. 19. No. 15. Article 3401. DOI: 10.3390/s19153401.
10. *Lu H., Zhao Sh., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M. Sh., Xiang W.* Internet of things cloud: Architecture and implementation // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. No. 12. P. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM.
11. *Xu B., Zheng J., Wang Q.* Analysis and design of real-time micro-environment parameter monitoring system based on Internet of Things // Proceeding of the IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). 2016. P. 368–371. DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.87.
12. *Madhuri V. M., Gunjal G. H. S., Kamalapurkar S.* Air pollution prediction using machine learning supervised learning approach // International Journal of Scientific & Technology Research (IJSTR). 2020. Vol. 9. No. 4. P. 118–123.

13. *Кычкин А. В., Горшков О. В.* Разработка программной системы для управления IoT-устройствами с использованием структурных и поведенческих паттернов // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 4 (88). С. 44–53. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-4-44-53.
14. *Raj A., Jasmine K.* Building microservices with Docker compose // The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis. 2021. Vol. XIII. No. V. P. 1215–1219.
15. *Cesa-Bianchi N., Lugosi G.* Prediction, Learning, and Games. – New York, N.Y.: Cambridge University Press, 2006. – 403 p.
16. *Amrutha C., Prasad B. G.* Air pollutant concentration prediction using ensemble of machine learning techniques // International Journal of Research in Electronics and Computer Engineering. 2018. Vol. 6. No. 3. P. 406–412.
17. *Kychkin A., Deryabin A., Neganova E., Markvirer V.* IoT-based energy management assistant architecture design // Proceeding of the IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI). 2019. P. 522–530. DOI: 10.1109/CBI.2019.00067.
18. *Tao F., Zuo Y., Xu L. D., Zhang L.* IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. Vol. 10. No. 2. P. 1547–1557. DOI: 10.1109/TII.2014.2306397.

### Сведения об авторах

*Кычкин Алексей Владимирович*, ORCID 0000-0003-0626-5803, канд. техн. наук, доцент, кафедра информационных технологий в бизнесе, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Пермь, Россия, avkychkin@hse.ru

*Горшков Олег Владимирович*, ORCID 0000-0002-1278-5568, магистрант, кафедра информационных технологий в бизнесе, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Пермь, Россия, ovgorshkov@hse.ru

*Кукаркин Михаил Андреевич*, ORCID 0000-0002-3570-9998, магистрант, факультет социально-экономических и компьютерных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Пермь, Россия, wardenlock@gmail.com

### Поддержка исследований

Публикация подготовлена в рамках гранта на поддержку исследовательских центров в сфере искусственного интеллекта, в том числе в области «сильного» искусственного интеллекта, систем доверенного искусственного интеллекта и этических аспектов применения искусственного интеллекта, предоставленного АНО «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации» в соответствии с соглашением о предоставлении субсидии (идентификатор соглашения о предоставлении субсидии 000000D730321P5Q0002) и договором с ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"» от 2 ноября 2021 г. № 70-2021-00139.

Статья поступила 17.03.2022, рассмотрена 07.04.2022, принята 20.06.2022

### References

1. Fan X., Zheng H. Design CEMS for flue gas from thermal power plant. Proceeding of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, pp.1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918261.
2. Jeong S. J. CALPUFF and AERMOD dispersion models for estimating odor emissions from industrial complex area sources. Asian Journal of Atmospheric Environment, 2011, vol.5, no.1, pp.1-7. DOI: 10.5572/ajae.2011.5.1.001.
3. Van Dingenen R. et al. TM5-FASST: a global atmospheric source-receptor model for rapid impact analysis of emission changes on air quality and short-lived climate pollutants. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, vol.18, no.21, pp.16173-16211. DOI: 10.5194/acp-18-16173-2018.
4. Liu H., Li Q., Yu D., Gu Yu. Air quality index and air pollutant concentration prediction based on machine learning algorithms. Applied Sciences, 2019, vol.9, no.19, article 4069. DOI: 10.3390/app9194069.
5. Akhtar A., Masood S., Gupta Ch., Masood A. Prediction and analysis of pollution levels in Delhi using multilayer perceptron. In: Data Engineering and Intelligent Computing. Singapore: Springer, 2018, no.542, pp.563-572. DOI: 10.1007/978-981-10-3223-3\_54.
6. Shaban K., Kadri A., Rezk E. Urban air pollution monitoring system with forecasting models. IEEE Sensors Journal, 2016, vol.16, no.8, pp.2598-2606. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2514378.

7. Dhingra S., Babu M. R., Gandomi A. H., Ratan R. Internet of Things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair). *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, vol.6, no.3, pp.5577-5584. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2903821.
8. Arévalo F., Ibrahim M. T., Diprasetya R. M., Flores-Cortez O. O., Schwung A. Monitoring and forecasting of air emissions with IoT measuring stations and a SaaS cloud application. *Proceeding of the 2nd International Conference on Societal Automation (SA)*, 2021, pp.1-6. DOI: 10.1109/SA51175.2021.9507127.
9. Toma C., Alexandru A., Popa M., Zamfiroiu A. IoT solution for smart cities' pollution monitoring and the security challenges. *Sensors*, 2019, vol.19, no.15, article 3401. DOI: 10.3390/s19153401.
10. Lu H., Zhao Sh., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M. Sh., Xiang W. Internet of things cloud: Architecture and implementation. *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol.54, no.12, pp.32-39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM.
11. Xu B., Zheng J., Wang Q. Analysis and design of real-time micro-environment parameter monitoring system based on Internet of Things. *Proceeding of the IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, 2016, pp.368-371. DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.87.
12. Madhuri V. M., Gunjal G. H. S., Kamalapurkar S. Air pollution prediction using machine learning supervised learning approach. *International Journal of Scientific & Technology Research (IJSTR)*, 2020, vol.9, no.4, pp.118-123.
13. Kychkin A., Gorshkov O. Structural and behavioral pattern-based software development for IoT devices control. *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2020, vol.15, no.4(88), pp.44-53 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-4-44-53.
14. Raj A., Jasmine K. Building microservices with Docker compose. *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 2021, vol.XIII, no.V, pp.1215-1219.
15. Cesa-Bianchi N., Lugosi G. *Prediction, Learning, and Games*. New York, N.Y., Cambridge University Press, 2006, 403 p.
16. Amrutha C., Prasad B. G. Air pollutant concentration prediction using ensemble of machine learning techniques. *International Journal of Research in Electronics and Computer Engineering*, 2018, vol.6, no.3, pp.406-412.
17. Kychkin A., Deryabin A., Neganova E., Markvirer V. IoT-based energy management assistant architecture design. *Proceeding of the IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI)*, 2019, pp.522-530. DOI: 10.1109/CBI.2019.00067.
18. Tao F., Zuo Y., Xu L. D., Zhang L. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, vol.10, no.2, pp.1547-1557. DOI: 10.1109/TII.2014.2306397.

## About the authors

*Aleksey V. Kychkin*, ORCID 0000-0003-0626-5803, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Business Information Technology Department, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia, avkychkin@hse.ru

*Oleg V. Gorshkov*, ORCID 0000-0002-1278-5568, Master's Student, Business Information Technology Department, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia, ovgorshkov@hse.ru

*Mikhail A. Kukarkin*, ORCID 0000-0002-3570-9998, Master's Student, Computer Science, Economics and Social Sciences Department, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia, wardenclack@gmail.com

## Acknowledgments

The publication was supported by the grant for research centers in the field of AI provided by the Analytical Center for the Government of the Russian Federation (ACRF) in accordance with the agreement on the provision of subsidies (identifier of the agreement 000000D730321P5Q0002) and the agreement with HSE University No. 70-2021-00139 of November 2, 2021.

Received 17.03.2022, reviewed 07.04.2022, accepted 20.06.2022

# Интеллектуальный анализ данных в управлении российской высшей школой

*М. В. Забоев<sup>1</sup>, В. Г. Халин<sup>1\*</sup>, Г. В. Чернова<sup>1</sup>, А. В. Юрков<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

*\* v.halin@spbu.ru*

**Аннотация.** Для всесторонней оценки качества управленческих решений необходимо иметь возможность учета разнородной информации, которая может быть представлена как в числовой форме, так и в виде выражений на естественном языке. Эффективным подходом к обработке трудно формализуемой информации является использование методов интеллектуального анализа данных, в том числе нейросетевых методов кластеризации и теории нечетких множеств. Это позволяет совмещать методы качественной оценки с возможностью получения количественных результатов. В статье представлен авторский подход к использованию этих методов для оценки рисков и качества управленческих решений в российской высшей школе на примере реализации самого масштабного для нее проекта – Проекта 5-100. На его примере доказана целесообразность использования нейросетевого метода кластеризации для оценки возможности достижения поставленных целей любого подобного масштабного проекта. Применение другого метода интеллектуального анализа – построение комплекса систем нечеткого вывода – подтвердило возможность построения на основе полученных по проекту экспертных вербальных оценок итоговой количественной оценки проекта. Кластеризация информационной базы данных, использованной для анализа, дает возможность осуществлять объективный отбор вузов – кандидатов на право получения государственной субсидии, а также корректировать состав участников Проекта 5-100. При этом нейросетевой метод кластеризации изначально проиллюстрировал недостижимость целей, поставленных перед Проектом 5-100, а применение комплекса систем нечеткого вывода подтвердило это утверждение – количественная итоговая оценка проекта, полученная на основе вербальных экспертных мнений, является очень низкой, что также оценивает этот проект как неудовлетворительный.

**Ключевые слова:** кластеризация, карта Кохонена, нечеткие множества, управленческие решения, высшая школа, Проект 5-100, риски

**Для цитирования:** *Забоев М. В., Халин В. Г., Чернова Г. В., Юрков А. В.* Интеллектуальный анализ данных в управлении российской высшей школой // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 17–36. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-17-36

# Data mining in the management of the Russian higher school

M. Zaboev<sup>1</sup>, V. Khalin<sup>1\*</sup>, G. Chernova<sup>1</sup>, A. Yurkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

\* v.halin@spbu.ru

**Abstract.** For a comprehensive assessment of the management decisions quality, it is necessary to take into account heterogeneous information presented both in numerical form and in natural language expressions. The effective occurs the use of data mining including neural network clustering and fuzzy set theory. The article presents our approach to the use of these methods for evaluating risks and the management decisions quality in Russian higher education on the example of the implementation of the most ambitious Project 5-100 for it. On the example, the expediency of the neural network clustering to assess the possibility of achieving the goals of any such large-scale project has been proved. Clustering the information database used for the analysis, makes it possible to carry out an objective selection of candidate universities-candidates for the right to receive state subsidies, as well as to adjust the composition of the Project participants. Another methods of intellectual analysis – the construction of a complex of fuzzy inference systems, – confirmed the possibility of a quantitative final evaluating of the project based on the expert verbal estimates of the project. At the same time, the neural network clustering initially illustrated the unattainability of the Project 5-100 goals. The use of a complex of fuzzy inference systems confirmed this statement by the very low quantitative final assessment of the project on the basis of verbal expert opinions.

**Keywords:** clustering, Kohonen map, fuzzy sets, managerial decisions, higher education, Project 5-100, risks

**For citation:** Zaboev M., Khalin V., Chernova G., Yurkov A. Data mining in the management of the Russian higher school. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.17-36 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-17-36

## Введение

Для всесторонней оценки качества управленческих решений необходимо иметь возможность учета разнородной информации, которая может быть представлена как в числовой форме, так и в виде выражений на естественном языке. Эффективным подходом к обработке трудно формализуемой информации является использование методов интеллектуального анализа данных. Это позволяет совмещать методы качественной оценки с возможностью получения на ее основе количественных результатов.

Целью данной статьи является описание авторского подхода к применению нейросетевых и нечетко-логических методов к анализу качества и рисков управленческих решений, а также подтверждение возможности их использования для построения достоверного прогноза достижимости стратегических целей крупномасштабных проектов реформирования российской высшей школы и принимаемых по ним управленческих решениям.

Результаты исследования демонстрируются на основе анализа Проекта 5-100 – самого амбициозного и крупного по госбюджетным затратам мероприятия в российской высшей школе за последние 30 лет ее реформ.

Сравнение построенного в самом начале его реализации прогноза и полученных реальных результатов по Проекту 5-100 (далее – Проект) дает возможность говорить о целесообразности применения рассматриваемых методов интеллектуального анализа данных для предварительной оценки осуществления любого масштабного проекта, в том числе по развитию российской высшей школы.

Актуальность результатов исследования подтверждается тем, что в 2020 г. Проект 5-100 завершился. Как показала практика, он не достиг поставленных целей. Результаты его реализации вызвали активную научную дискуссию не только по качеству государственной образовательной политики, но и по последствиям для всей системы высшего образования России [1–12].

Анализ качества любого управленческого решения (УР) предусматривает выбор и обоснование критериев оценивания (например, таких как «УР является обоснованным и реально осуществимым», «УР обеспечено необходимыми ресурсами» и др.); выбор шкалы и методов оценки; проверку выполнения требований по каждому критерию; определение итоговой оценки качества УР. Выполнение требований всех критериев качества оцениваемого УР будет означать его высокое качество, а их невыполнение – низкое качество и возможное появление отрицательных последствий при его реализации [13]. Как показывает практика, не всегда и не все принимаемые УР дают ожидаемый положительный результат. Часть из них может привести к нежелательным отрицательным последствиям. Именно поэтому важно с самого начала уметь оценивать принимаемое УР с позиций возможных сопутствующих ему рисков как неопределенной возможности появления отрицательных последствий принятия и внедрения этого УР. Возможность получения отрицательного последствия по определению УР можно оценить через риск, описываемый двумя важнейшими характеристиками, – вероятность

реализации риска и ущерб, обусловленный этой реализацией [14–16].

## Проект 5-100: основные параметры и риски управления

Проект был инициирован Указом Президента РФ от 07 мая 2012 г. № 599<sup>1</sup>, которым Правительству РФ было поручено обеспечить «вхождение к 2020 г. не менее пяти российских университетов в первую сотню ведущих мировых университетов согласно мировому рейтингу университетов». Реализация Проекта 5-100 подразумевала разработку и внедрение взаимосвязанных УР на уровне Президента России, на уровне федеральной исполнительной власти (Правительство РФ, Минобрнауки России и Совет Проекта 5-100) и на уровне вузов – участников Проекта.

Правительство РФ определило 23 вуза-участника, которым за весь период реализации Проекта (2012–2020 гг.) было дополнительно выделено целевым образом на повышение своей конкурентоспособности из государственного бюджета субсидий общим объемом почти 100 млрд рублей [17, 18]. Это Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ), Национальный исследовательский университет «Московский физико-технический институт» (НИУ МФТИ), Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ МИСиС), Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт» (НИЯУ МИФИ), НИУ «Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского

<sup>1</sup> URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/35263>

(ННГУ им. Лобачевского), Новосибирский национальный исследовательский госуниверситет (НГУ), Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (НИУ «Самарский университет»), Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбПУ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В. И. Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ), Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), НИУ «Томский госуниверситет» (ТГУ), НИУ «Томский политехнический университет» (ТПУ), Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УФУ), Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта (БФУ), Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова (Первый МГМУ им. Сеченова), Российский университет дружбы народов (РУДН), Сибирский федеральный университет (СФУ), Тюменский госуниверситет (ТюмГУ), Южно-Уральский национальный исследовательский госуниверситет (ЮУрГУ).

### Особенности финансирования Проекта 5-100

Во-первых, МГУ и СПбГУ получали дополнительное госбюджетное финансирование на повышение конкурентоспособности в рамках корректировки своих Программ развития до 2020 г., утвержденных Правительством РФ<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Программа развития МГУ им. М. В. Ломоносова до 2020 года одобрена распоряжением Правительства РФ от 27 сентября 2010 г. № 1617-р (в ред. распоряжения Правительства РФ от 26 июня 2014 г. № 1155-р). URL: <http://government.ru/docs/all/91977/> (дата обращения: 19.05.2022); Программа развития СПбГУ до 2020 года одобрена распоряжением Правительства РФ от 7 октября 2010 г. № 1696-р (в ред. распоряжения Правительства РФ от 26 июня 2014 г. № 1156-р). URL: <http://government.ru/docs/all/74289/#> (дата обращения: 19.05.2022).

Во-вторых, все остальные вузы – участники Проекта, в зависимости от своих достижений и по представлению Совета Проекта 5-100, получали государственные субсидии на повышение своей конкурентоспособности, объем которых утверждался ежегодного специальным распоряжением Правительства РФ. В таблице 1 приведены подробные данные по объемам дополнительных государственных субсидий, которые получили вузы-участники, непосредственно подчиненные Минобрнауки России (округлены до целых).

В-третьих, государственные расходы на образование (в том числе на высшее образование) в процентах к ВВП в России на момент начала финансирования Проекта в 2013 г. составляли 4,4% (в том числе 0,8% на высшее образование), а к завершению Проекта в 2020 г. – 4,0% (в том числе 0,6% на высшее образование) [19]. Из приведенных выше данных следует, что за период реализации Проекта 5-100 государственные расходы на высшую школу России и на всю российскую систему образования в целом в процентах к ВВП не только не увеличились, а даже уменьшились.

*Анализ дорожных карт и программ развития до 2020 г. вузов – участников Проекта*, которые разрабатывались и принимались каждым университетом самостоятельно, а затем утверждались на уровне Правительства РФ или на уровне Минобрнауки России, показал следующее [17].

Во-первых, в дорожных картах и программах развития всех вузов-участников обязательно присутствует один или несколько ключевых индикаторов, для каждого вуза свои, по которым указаны их ожидаемые к 2020 г. позиции в общих мировых рейтингах ARWU, THE и QS. Так, например, в Программе развития СПбГУ до 2020 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 26 июня 2014 г. № 1156-р, в разделе V ключевой индикатор № 29 «Наивысшая позиция (с точностью до 50) в ведущих мировых рейтингах (в общем списке)» в 2020 г. имеет значение, равное 100. Это означает,

**Таблица 1.** Госсубсидии 2013–2020 гг. вузам – участникам Проекта 5-100  
**Table 1.** State subsidies of 2013-2020 to Universities – members of the Project 5-100

№ No.	Университеты Universities	Государственные субсидии по Проекту 5-100 (млн руб.) State subsidies under the Project 5-100 ( P, millions)								
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Итого
1	ВШЭ / HSE	592	950	930	900	849	809	861	876	<b>6767</b>
2	ИТМО / ITMO	592	775	964	900	849	809	861	876	<b>6626</b>
3	МФТИ / MIPT	592	950	761	900	849	809	861	876	<b>6598</b>
4	МИФИ / MEFPhI	592	950	761	900	849	809	861	876	<b>6598</b>
5	МИСиС / MISiS	592	775	761	900	849	809	861	876	<b>6423</b>
6	НГУ / NSU	592	775	761	900	849	809	861	876	<b>6423</b>
7	ТГУ / TSU	592	600	964	511	482	809	861	876	<b>5695</b>
8	КФУ / KFU	592	600	378	900	849	472	431	438	<b>4660</b>
9	ТПУ / Tomsk Polytechnic	592	600	964	511	482	472	431	438	<b>4489</b>
10	УФУ / UrFU	592	775	761	511	482	472	431	438	<b>4462</b>
11	СПбПУ / SPbPU	592	600	761	511	482	472	431	438	<b>4287</b>
12	ДВФУ / FEFU	592	600	425	511	482	135	123	125	<b>2994</b>
13	НИУ «Самарский университет» / Samara University	406	600	467	511	482	135	123	125	<b>2850</b>
14	ННГУ им. Лобачевского / Lobachevsky University	592	600	482	150	142	135	123	125	<b>2349</b>
15	ЛЭТИ / ETU LETI	592	0	0	150	142	135	123	125	<b>1267</b>
16	Первый МГМУ им. Сеченова / Sechenov University				511	482	472	431	438	<b>2336</b>
17	РУДН / RUDN University				150	142	472	431	438	<b>1632</b>
18	ТюмГУ / University of Tyumen				150	142	472	431	438	<b>1632</b>
19	БФУ / IKBFU				150	142	135	123	125	<b>674</b>
20	СФУ / SibFU				150	142	135	123	125	<b>674</b>
21	ЮУрГУ / SUSU				150	142	135	123	125	<b>674</b>
	<b>ИТОГО / TOTAL</b>	<b>8700</b>	<b>10 150</b>	<b>10 140</b>	<b>10 927</b>	<b>10 310</b>	<b>9908</b>	<b>9902</b>	<b>10 072</b>	<b>80 109</b>

Источник: составлено авторами на основании данных сайта Проекта 5-100 [14].

что если бы в 2020 г. СПбГУ занял хотя бы в одном из рейтингов ARWU, THE и QS позицию не ниже 150, то этот ключевой индикатор у него считался бы выполненным. Аналогичные формулировки этого ключе-

вого индикатора представлены в программах развития МГУ и МИФИ.

Во-вторых, в дорожных картах и программах развития у 15 из 23 вузов – участников Проекта значения этих ключевых

индикаторов позиций в 2020 г. предусматривали попадание этих 15 вузов в топ-100 хотя бы в одном из общих мировых рейтингов ARWU, THE и QS. Для остальных 8 вузов-участников (ДВФУ, ИТМО, Первый МГМУ им. Сеченова, РУДН, НИУ «Самарский университет», СФУ, ТюмГУ, ЮУрГУ) значения этих ключевых индикаторов в 2020 г. изначально были ниже 150 позиции в общих мировых рейтингах и заранее не предполагали вхождение этих вузов в топ-100 хотя бы одного из этих рейтингов [14, 17].

Анализ управленческих решений, принимаемых на всех уровнях Проекта 5-100, позволил выявить следующие риски управления:

- риск недостижения стратегических целей, которые зафиксированы в Указе Президента России, постановлениях Правительства РФ, распоряжениях Минобрнауки России, дорожных картах и программах развития до 2020 г. вузов – участников Проекта;
- риск неспособности приоритетного ресурсного обеспечения развития российской высшей школы;
- риск неспособности обеспечить качественное государственное управление российской высшей школой;
- риск неспособности создать благоприятную систему управления в российских вузах, которая способствовала бы развитию талантов и привлечению в них ведущих профессоров, ученых и одаренных обучающихся;
- риск необоснованности принимаемых управленческих и финансовых решений;
- риск неудовлетворительного распределения финансов по различным направлениям развития высшей школы, например по разным программам и проектам, по вузам – участникам Проекта;
- риск недостаточности как на уровне всей российской высшей школы, так и на уровне конкретных вузов, финансовых средств, необходимых для достижения поставленных стратегических целей и задач их развития;
- риск недостаточности имеющихся у вуза финансовых средств, используемых для до-

стижения целей и задач, принятых в дорожных картах и/или программах его развития и т. д. [18].

В приведенных выше примерах речь идет о возможном, вероятностном проявлении отрицательных последствий принимаемых УР. Проведенный предварительный анализ по каждому из возможных отрицательных последствий принятия конкретного УР может стать основой совокупности программ управления рисками в российской высшей школе, отвечающих разным уровням ее управления, связанных между собой и направленных на минимизацию возможных отрицательных потерь.

Значимость перечисленных рисков и возможные большие потери, связанные с ними, определяют как очень важную проблему прогноза их реализации. К числу методов прогноза реализации таких рисков можно отнести методы интеллектуального анализа данных.

### **Методы интеллектуального анализа данных для оценки качества и рисков управления Проектом 5-100**

*Оценка глобальной конкурентоспособности ведущих российских вузов на основе методов интеллектуального анализа данных.* В статье [4] был предложен подход к оценке позиций российских университетов в авторитетных мировых рейтингах в 2020 г. на основе показателей их деятельности, представленных в информационной базе данных InCites за 2012 г., и целевых ориентиров, указанных в программах их развития до 2020 г. [6, 9].

Предложенный подход на основе выделения кластеров позволил преодолеть недостатки, связанные с рассмотрением динамики позиций отечественных университетов непосредственно в рейтингах, к числу которых относятся следующие:

- высокие позиции университетов в одних авторитетных мировых рейтингах не гаран-

тируют им высокие позиции в других рейтингах;

- методика составления мировых рейтингов постоянно совершенствуется и меняется, что приводит к существенным изменениям позиций ряда университетов в этих рейтингах.

В указанной выше статье говорится о том, что авторы еще в 2014 г. доказали: возможность попадания в топ-100 мировых рейтингов к 2020 г. была лишь у одного российского университета – МГУ [2, 4, 9]. Это подтверждается актуальными позициями отечественных университетов в мировых рейтингах: в 2020 г. только МГУ попал в топ-100 общих мировых рейтингов, заняв 93-е место в Шанхайском рейтинге ARWU и 74-е место в рейтинге QS [20–22].

Полученные выводы о перспективах продвижения ведущих университетов в рейтингах строятся на результатах кластеризации ведущих мировых университетов на основе объективных показателей их деятельности. На основе формальных регрессионных, корреляционных и экспертных методов было выделено восемь ключевых показателей деятельности университетов, представленных в информационной базе данных InCites:

- Академический штат / Количество студентов (Acad staff / Stdnt);
- Преподаватели с иностранным гражданством / Академический штат (Acad staff int / Acad staff);
- Количество присужденных научных степеней / Академический штат (Doctoral degree / Acad staff);
- Цитирование на одну публикацию (Normalized citation impact – country adj);
- Количество публикаций (Papers);
- Работы, написанные в международном соавторстве на одну публикацию (Papers int co-author / Papers);
- Доходы от научной деятельности / Академический штат (Res income / Acad staff);
- Студенты с иностранным гражданством / Общая численность студентов (Stdnt int / Stdnt).

Краткое описание кластеров, приведенных на рисунке 1, построенных на основе данных за 2012 г., и положение в них российских вузов представлено ниже.

1-й кластер – университеты – мировые лидеры. В него вошло 107 университетов. Кластер характеризуется высоким показателем публикационной активности. Университетам, сформировавшим 1-й кластер, свойственны наиболее высокие значения показателя Res income / Acad staff и значения «выше среднего» по остальным показателям.

2-й кластер характеризуется высокими показателями международной деятельности.

3-й и 4-й кластеры – университеты, занимающие «средние» позиции. При этом в 3-й кластер вошли МГУ, СПбГУ, МИФИ, НГУ.

5-й кластер – университеты, занимающие позиции «ниже среднего». В нем расположились остальные 17 отечественных университетов, представленных в 2012 г. в базе данных InCites (ДВФУ, ВШЭ, ИТМО, МИСиС, КФУ, МФТИ, Первый МГМУ им. Сеченова, ННГУ им. Лобачевского, РУДН, СФУ, ТГУ, ТПУ, УФУ, Европейский университет в Санкт-Петербурге, МГТУ им. Н. Э. Баумана, РГУНГ, ВГУ) [4].

Анализ пороговых значений показателей, необходимых для перемещения в лидирующий 1-й кластер, показал, что реальная возможность перемещения из 3-го кластера в 1-й по состоянию на 2012 г. была только у МГУ. Тем самым прогноз успешной реализации заявленных в Проекте 5-100 целей был оценен авторами на крайне низком уровне. Указанный вывод подтверждается визуализацией карты Кохонена, где нейрон, соответствующий МГУ, расположен на границе с 1-м лидирующим кластером. Еще три ведущих российских университета хотя и вошли в 3-й кластер, но находятся на его периферии и ближе к 5-му кластеру с характеристиками университетов «ниже среднего», чем к лидирующему 1-му кластеру.

Таким образом, на основе данных за 2012 г. в InCites и карт Кохонена в 2014 г. доказано,

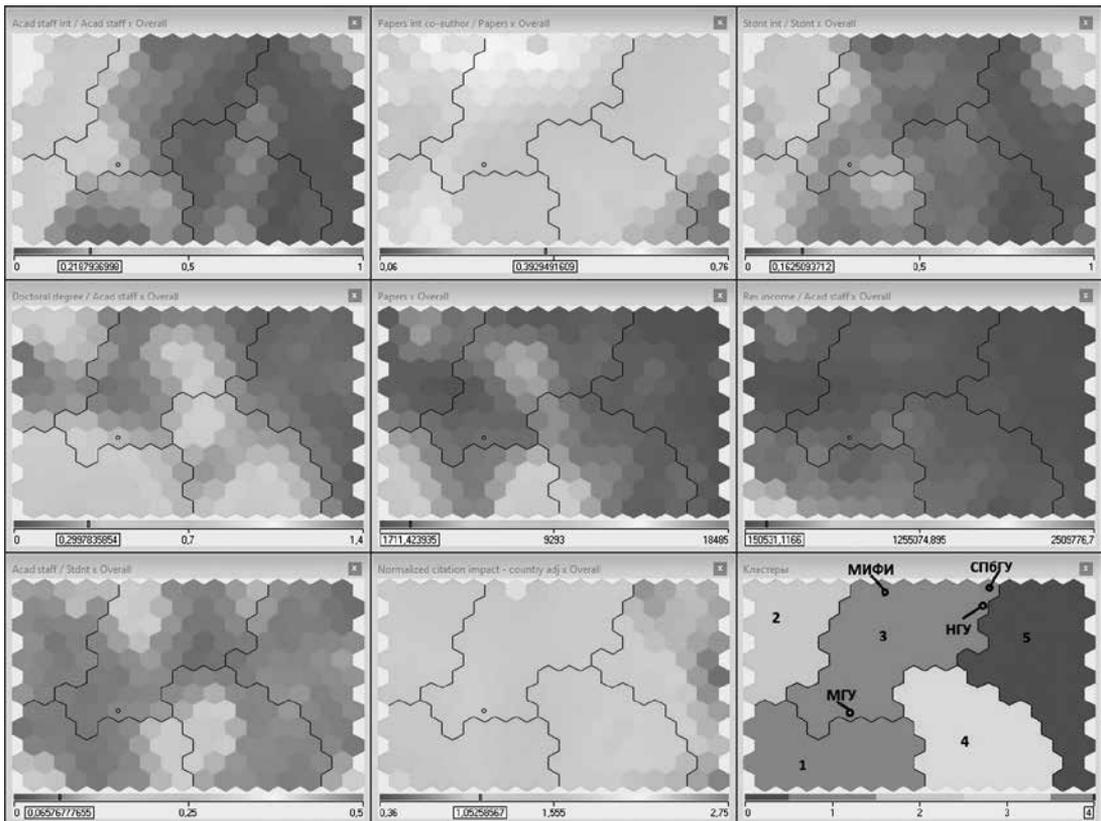


Рис. 1. Кластеризация университетов на основе данных 2012 г.

Fig. 1. University clustering on 2012 data

что возможность попадания в топ-100 мировых рейтингов к 2020 г. была лишь у одного российского университета – МГУ [2, 4, 6].

С целью *определения динамики развития российских вузов и промежуточных результатов Проекта 5-100* представленный подход к кластеризации дополнительно был применен к значениям показателей деятельности университетов, взятых из базы InCites за 2018 г. Основными итогами кластеризации по данным 2018 г. являются следующие результаты:

- в лидирующий кластер, так же как и 2020 г., не попал ни один российский университет;
- из 5-го кластера, характеризующегося, как «ниже среднего», в 3-й и 4-й кластер переместились 14 вузов (в том числе 11 вузов – участников Проекта – ДВФУ, ИТМО,

КФУ, МИСиС, ННГУ им. Лобачевского, РУДН, СФУ, ТГУ, ТПУ, УФУ, Первый МГМУ им. Сеченова);

- вместе с тем в 2018 г. единственным российским вузом, которому соответствовал нейрон, расположенный на границе с 1-м лидирующим кластером, по-прежнему остался лишь МГУ. Из этого следует, что никакой другой российский вуз, кроме него, не имел шансов попасть в 2020 г. в топ-100 авторитетных общих мировых рейтингов [4, 9, 23].

Из представленных выше данных следует, что гипотеза исследования, которая была высказана еще в 2014 г., на основе применения нейросетевых методов и количественных данных из базы данных InCites за 2012 г., получила дополнительное подтверждение на данных 2018 г. – невозможность достижения целей Проекта 5-100 в 2020 г. [2, 4, 9].

В результате исследования на примере Проекта были доказаны следующие достоинства и преимущества применения нейросетевых методов для анализа управленческих решений:

- на основе количественных показателей деятельности ведущих российских вузов, представленных в информационной базе данных InCites за 2012 г., еще в 2014 г. был сделан объективный прогноз и оценка реальной достижимости стратегической цели Проекта 5-100. Авторский прогноз выполнения Проекта, сделанного на основе применения нейросетевых методов, полностью подтвердился. Поставленная цель в Указе Президента России № 599 не достигнута. Более того, показатель выполнимости Указа Президента составил 20% (1 из 5), а показатель выполнимости ключевого индикатора дорожных карт и программ развития по всем 23 вузам – участникам Проекта составил 4,3% (1 из 23);

- кластеризация информационной базы данных InCites за 2012 г. по выбранным ключевым показателям деятельности ведущих университетов дополнительно позволяет осуществить объективный отбор ведущих российских вузов – кандидатов на право получения государственной субсидии для повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Так, например, результаты кластеризации и учет значения ключевых показателей программ развития ведущих российских вузов по попаданию в 2020 г. в топ-100 хотя бы одного из общих мировых рейтингов дают следующий приоритетный список из 12 возможных вузов – участников Проекта: МГУ, СПбГУ, МИФИ, НГУ, МФТИ, ВШЭ, КФУ, ННГУ им. Лобачевского, МИСиС, ТГУ, ТПУ, УФУ [4, 9];

- кластеризация информационной базы данных InCites за 2018 г. по выбранным ключевым показателям деятельности ведущих университетов позволяет скорректировать объективный состав вузов – участников Проекта 5-100 на получение государствен-

ной субсидии для повышения их конкурентоспособности на период 2018–2020 гг. Так, например, результаты кластеризации и состав вузов, попавших в 3-й и 4-й кластеры, а также учет значения ключевого показателя их программ развития по попаданию в 2020 г. в топ-100 хотя бы одного из общих мировых рейтингов позволяют сформулировать следующие рекомендации по финансированию вузов-участников на 2018–2020 гг.: выплату дополнительных субсидий целесообразно продолжить лишь 12 вузам – участникам Проекта (МГУ, СПбГУ, МИФИ, НГУ, МФТИ, ВШЭ, МИСиС, КФУ, ТГУ, ТПУ, УрФУ, ННГУ им. Лобачевского), а остальным 11 вузам (БФУ, ДВФУ, ИТМО, ЛЭТИ, Первый МГМУ им. Сеченова, РУДН, НИУ «Самарский университет», СПбПУ, СФУ, ТюмГУ, ЮУрФУ) выплату субсидий продолжать не целесообразно [4, 23].

Перечисленные выше достоинства и преимущества применения нейросетевых методов для анализа качества принимаемых управленческих решений (на примере Проекта 5-100) существенно упрощают и помогают не допускать принятия некачественных и необоснованных УР на разных уровнях (от федерального до уровня вуза – участника Проекта), а также позволяют осуществлять более обоснованное и справедливое распределение госбюджетных средств между вузами – участниками Проекта. Это подтверждает целесообразность их использования в государственной образовательной политике.

*Методы нечеткой логики для оценки успешности реализации Проекта 5-100 на уровне высшей школы России.* Кроме показателей деятельности университетов, имеющих числовое представление в базе данных InCites за 2012 г., для оценки конкурентоспособности отдельных вузов и национальной системы высшего образования в целом могут быть дополнительно выделены еще две группы ключевых показателей (финансово-экономические и административно-право-

вые), оценки которых могут быть даны экспертами лишь в качественной (вербальной) форме. В связи с этим представляется эффективным использование модели на основе системы нечеткого управления, где нечетко-множественные конструкции позволяют экспертам формировать базу правил на естественном языке и подбирать параметры системы нечеткого вывода.

В качестве параметров системы нечеткого вывода для модели нечеткого управления, определяющих возможность успешного исполнения Проекта 5-100, выбраны следующие три группы показателей и их вербальные характеристики:

- финансово-экономические:
  - уровень государственных расходов в рамках Проекта 5-100;
  - доля расходов бюджета РФ на образование из федерального бюджета;
  - объем привлечения дополнительного целевого финансирования из внебюджетных источников;

- административно-правовые:
  - уровень нормативно-правового обеспечения выполнения Проекта;
  - уровень системы менеджмента российских университетов;
  - социально-экономический и правовой статус профессорско-преподавательского состава (далее – ППС);
- объективные показатели деятельности университетов (на основе результатов кластеризации вузов по данным базы InCites за 2012 г. [4, 9]).

Для первых двух групп показателей предлагается построение систем нечеткого вывода типа Мамдани, которые на основе нечетких правил и конкретных реализаций каждого показателя позволяют оценить обобщенные характеристики финансово-экономического и административно-правового показателей как в нечеткой, так и в точной форме [9]. Пример формирования параметров системы нечеткого вывода для оценки группы финансово-экономических показателей приведен в таблице 2.

**Таблица 2.** Параметры системы нечеткого вывода для оценки финансово-экономических показателей  
**Table 2.** Parameters of the fuzzy inference system for evaluating financial and economic indicators

Лингвистическая переменная <i>Linguistic variable</i>	Базовое термножество <i>Values of the linguistic variables (fuzzy sets)</i>	Тип функции принадлежности <i>Type of the membership functions</i>	Параметры функции принадлежности <i>Parameters of the membership function</i>
Уровень государственных расходов в рамках Проекта 5-100 <i>The level of public spending under the Project 5-100</i>	Низкий Средний Высокий Low Middle High	Треугольная <i>Triangle</i>	Оценка в баллах от 0 до 10 <i>Score in points from 0 to 10</i>
Доля расходов бюджета РФ на образование из федерального бюджета <i>The share of the Russia budget expenditures on education from the federal budget</i>	Низкий Средний Высокий Low Middle High		

Лингвистическая переменная <i>Linguistic variable</i>	Базовое терм-множество <i>Values of the linguistic variables (fuzzy sets)</i>	Тип функции принадлежности <i>Type of the membership functions</i>	Параметры функции принадлежности <i>Parameters of the membership function</i>
Объем привлечения дополнительного целевого финансирования из внебюджетных источников <i>The volume of attracting additional targeted funding from extra-budgetary sources</i>	Низкий Средний Высокий <i>Low</i> <i>Middle</i> <i>High</i>	Треугольная <i>Triangle</i>	Оценка в баллах от 0 до 10 <i>Score in points from 0 to 10</i>
Характеристика финансово-экономических показателей <i>Characteristics of financial and economic indicators</i>	Низкий Средний Высокий <i>Low</i> <i>Middle</i> <i>High</i>		

Пример нечеткого правила, с помощью которого эксперты формулируют логические высказывания, приведен ниже.

ЕСЛИ	уровень расходов в рамках Проекта 5-100	<b>высокий</b>
И	доля расходов бюджета РФ на образование	<b>низкая</b>
И	объем финансов из внебюджетных источников	<b>низкий</b>
ТО	характеристика финансово-экономических показателей	<b>низкая</b>

Аналогичным образом эксперты формируют параметры системы для оценки группы административно-правовых показателей.

Качественная или вербальная оценка объективных показателей деятельности университетов (на основе результатов кластеризации с помощью карт Кохонена) производится исходя из количества вузов, близких к лидирующему кластеру. Так как на основе данных базы InCites за 2012 г. только один российский университет был близок к лидирующему кластеру, оценка по 10-балльной шкале для данного фактора составляет **2 балла**, что соответствуют качественной характеристике «**низкий**».

Параметры итоговой системы нечеткого вывода, определяющей возможность успешного исполнения Проекта 5-100, представлены в таблице 3.

На рисунке 2 приведен пример нечетких множеств «низкая», «средняя», «высокая», соответствующих терм-множествам лингвистической переменной «Характеристика финансово-экономических показателей».

В указанной итоговой системе входными переменными являются результирующие значения первых двух систем для финансово-экономической и административно-правовой групп показателей, а также оценка конкурентоспособности отечественных университетов на основе кластерного анализа.

Для формирования оценки выполнимости Проекта 5-100 используются следующие исходные данные, соответствующие экспертным оценкам по состоянию на 2012 г. [4, 9]:

- уровень государственных расходов в рамках Проекта – **4 балла (средний)**;

**Таблица 3.** Параметры системы нечеткого вывода для оценки финансово-экономических показателей  
**Table 3.** Parameters of the fuzzy inference system for evaluating financial and economic indicators

Лингвистическая переменная <i>Linguistic variable</i>	Базовое термножество <i>Values of the linguistic variables (fuzzy sets)</i>	Тип функции принадлежности <i>Type of the membership functions</i>	Параметры функции принадлежности <i>Parameters of the membership function</i>
Характеристика финансово-экономических показателей <i>Characteristics of financial and economic indicators</i>	Низкий Средний Высокий <i>Low</i> <i>Middle</i> <i>High</i>		
Характеристика административно-правовых показателей <i>Characteristics of administrative and legal indicators</i>	Низкий Средний Высокий <i>Low</i> <i>Middle</i> <i>High</i>	Треугольная <i>Triangle</i>	Оценка в баллах от 0 до 10 <i>Score in points from 0 to 10</i>
Характеристика объективных показателей деятельности университетов <i>Characteristics of objective performance indicators of universities</i>	Низкий Средний Высокий <i>Low</i> <i>Middle</i> <i>High</i>		
<b>Оценка выполнимости Проекта 5-100</b> <i>Feasibility assessment of the Project 5-100</i>	Низкий Средний Высокий <i>Low</i> <i>Middle</i> <i>High</i>		

- доля расходов бюджета РФ на образование из федерального бюджета – **2 балла (низкая)**;
- объем привлечения дополнительного целевого финансирования из внебюджетных источников – **3 балла (низкий)**;
- уровень нормативно-правового обеспечения выполнения Проекта – **3 балла (низкий)**;
- уровень системы менеджмента российских университетов – **4 балла (средний)**;
- социально-экономический и правовой статус ППС – **3 балла (низкий)**;

- объективные показатели деятельности университетов (на основе результатов кластеризации) – **2 балла (низкий)**.

Дефаззифицированные значения для характеристики финансово-экономических и административно-правовых показателей на основе систем нечеткого вывода и оценок значений факторов, приведенных выше, составляют 2,31 и 3,35 балла соответственно. Полученные выше значения вместе с оценкой объективных показателей деятельности

университетов (2 балла) используются в качестве входных значений для системы нечеткого вывода, формирующей итоговую интегральную на уровне всей российской высшей школы оценку выполнимости Проекта 5-100. Результат работы системы, реализованной в среде MatLab, представлен на рисунке 3.

На основе применения алгоритма нечеткого вывода было получено дефаззифицированное с помощью метода «центра тяжести» значение интегральной оценки выполнимости Проекта 5-100 по состоянию на 2012 г., равное 2,36 балла, но максимальная степень принадлежности итогового нечеткого числа

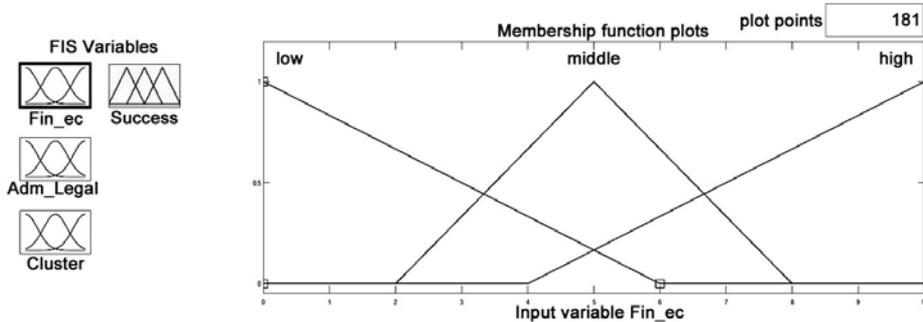


Рис. 2. Графическое представление нечетких терм-множеств лингвистической переменной «Характеристика финансово-экономических показателей»

Fig. 2. Graphical image of fuzzy term-sets of the linguistic variable "Characteristics of financial and economic indicators"

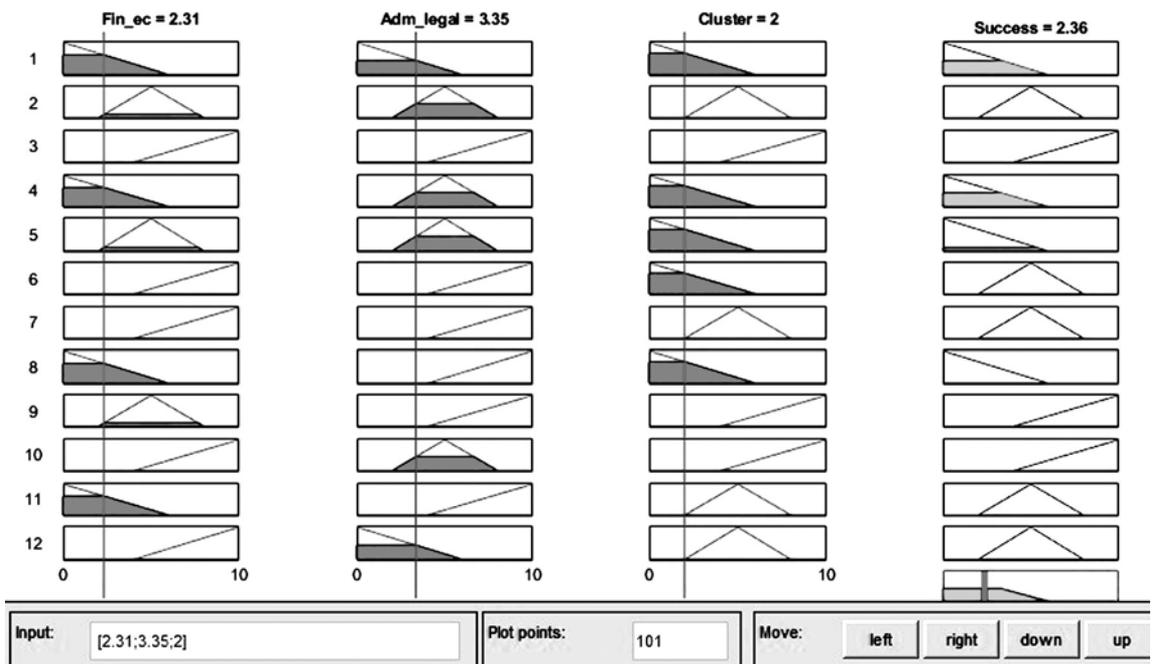


Рис. 3. Результат работы системы нечеткого вывода, определяющей оценку выполнимости Проекта 5-100

Fig. 3. The result of the operation of the fuzzy inference system, which determines the evaluation of the feasibility of the Project 5-100

имеет диапазон от 0 до 3,3 балла, что соответствует терм-множеству «низкая» [4, 9].

Разработанная система нечеткого вывода может быть использована для динамического определения возможности успешного исполнения Проекта 5-100 в течение срока его реализации. Для формирования интегральной оценки используются следующие результаты кластеризации университетов по данным 2018 г. и экспертные оценки показателей также по состоянию на 2018 г. [23]:

- уровень государственных расходов в рамках Проекта – **3 балла (низкий)**;
- доля расходов бюджета РФ на образование из федерального бюджета – **2 балла (низкая)**;
- объем привлечения дополнительного целевого финансирования из внебюджетных источников – **3 балла (низкий)**;
- уровень нормативно-правового обеспечения выполнения Проекта – **2 балла (низкий)**;
- уровень системы менеджмента российских университетов – **3 балла (низкий)**;
- социально-экономический и правовой статус ППС – **2 балла (низкий)**;
- объективные показатели деятельности университетов (на основе результатов кластеризации) – **4 балла (средний)**.

Дефаззифицированное значение интегральной оценки выполнимости Проекта 5-100 по состоянию на 2018 г. имеет значение 3,0 балла, что выше значения 2,36 балла, полученного для 2012 г. Рост интегральной оценки объясняется, в первую очередь, ростом показателя «Объективные показатели деятельности университетов (на основе результатов кластеризации)» с 2 до 4 баллов, положительное влияние которого оказалось существеннее снижения ряда значений финансово-экономических и административно-правовых показателей. Вместе с тем максимальная степень принадлежности итогового нечеткого числа имеет диапазон от 0 до 3,3 балла, что соответствует даже в 2018 г. терм-множеству «низкая» [4, 23].

Таким образом, применение методов нечеткой логики к анализу ключевых финансово-

экономических, административно-правовых и количественных показателей развития высшей школы России в 2012 г. позволило авторам сделать достоверный прогноз о том, что в сложившихся на тот момент времени условиях достижение стратегических целей Проекта 5-100 было невозможным. Проект 5-100 являлся по объективным показателям несвоевременным и нереалистичным, поскольку на уровне всей российской высшей школы не были созданы необходимые условия для его успешной реализации. В частности, не было обеспечено высокое качество управления этим Проектом, отсутствовали дополнительные финансовые ресурсы на его выполнение, не был обеспечен благоприятный социально-экономический и правовой статус академического штата в вузах России.

## Результаты выполнения Проекта 5-100 в 2020 г.

Подробные данные о планируемых и достигнутых значениях ключевого индикатора «Наивысшая позиция в ведущих мировых рейтингах (в общем списке)» в 2020 г. в дорожных картах и/или программах развития до 2020 г. по всем 23 вузам – участникам Проекта представлены в таблице 4 [14, 17, 18].

По завершении реализации Проекта 5-100 в 2020 г. вузами-участниками были достигнуты следующие результаты:

- только один российский вуз – МГУ, попал в топ-100 рейтингов ARWU (93-я позиция) и QS (74-е место), что полностью подтвердило авторский прогноз, построенный на основе нейросетевых методов в 2014 г.;
- никакой другой российский вуз не попал не только в топ-100, но даже в топ-200 ни одного из общих рейтингов университетов мира;
- вузы – участники Проекта БФУ, Первый МГМУ им. Сеченова и ТюмГУ не попали даже в топ-1000 ни одного из рейтингов ARWU, QS и THE [20–22].

**Таблица 4.** Целевые показатели 2020 г. и фактические позиции в мировых рейтингах

**Table 4.** Target indicators 2020 and actual positions in world rankings

№ No.	Университеты Universities	Индикатор–План Indicator–Plan			Индикатор–Факт Indicator–Fact			Выполнение Realization		
		ARWU	QS	THE	ARWU	QS	THE	ARWU	QS	THE
1	МГУ / MSU	50	50	50	93	74	174	Да	Да	
2	СПбГУ / SPbU	100	100	100	301–400	225	601–800	Нет	Нет	Нет
3	МФТИ / MIPT	151–200	51–100	75–100	401–500	281	201–250	Нет	Нет	Нет
4	НГУ / NSU	300–400	90–100	150–200	501–600	228	601–800	Нет	Нет	Нет
5	МИФИ / MEFhI	–	51–100	121–170	701–800	314	401–500	–	Нет	Нет
6	УрФУ / UrFU	–	100	250	701–800	331	1001+	–	Нет	Нет
7	ВШЭ / HSE	–	51–100	151–200	801–900	298	251–300	–	Нет	Нет
8	ТГУ / TSU	–	51–100	151–200	801–900	250	501–600	–	Нет	Нет
9	ИТМО / ITMO	–	171	251–300	901–1000	360	501–600	–	Нет	Нет
10	КФУ / KFU	–	99	115	901–1000	370	601–800	–	Нет	Нет
11	МИСиС / MISiS	–	–	100	901–1000	428	601–800	–	–	Нет
12	СПбПУ / SPbPU	–	51–100	150–200	–	401	301–350	–	Нет	Нет
13	ТГПУ / Tomsk Polytechnic	401–500	51–100	251–300	–	401	801–1000	Нет	Нет	Нет
14	ДВФУ / FEFU	–	200	950	–	493	1000+	–	Нет	Нет
15	НИУ «Самарский университет» / Samara University	–	251–300	–	–	591–600	1000+	–	Нет	–
16	ННГУ им. Лобачевского / Lobachevsky University	–	1–100	251–300	–	601–650	1000+	–	Нет	Нет
17	ЛЭТИ / ETU LETI	–	51–100	51–100	–	701–750	1000+	–	Нет	Нет
18	Первый МГМУ им. Сеченова / Sechenov University	–	301–350	351–400	–	–	–	–	Нет	Нет
19	РУДН / RUDN University	–	301–351	501–600	–	326	801–1000	–	Да	Нет
20	БФУ / IKBFU	–	100	–	–	–	1000+	–	Нет	–
21	СФУ / SibFU	401–500	201–250	301–350	–	1001+	1000+	Нет	Нет	Нет
22	ТюмГУ / University of Tyumen	–	401–450	–	–	–	–	–	Нет	–
23	ЮУрГУ / SUSU	–	251–300	401–500	–	801–1000	1001+	–	Нет	Нет

Анализ выполнения дорожных карт и/или программ развития до 2020 г. вузов – участников Проекта 5-100 показал следующее.

Во-первых, только МГУ полностью выполнил все свои обязательства по значениям ключевого индикатора позиций вхождения в общие мировые рейтинги, что также подтверждено авторским прогнозом 2014 г.

Во-вторых, РУДН выполнил обязательства по значению ключевого индикатора в общем рейтинге QS (326-я позиция), но не выполнил его в рейтинге THE (501–600-я позиция).

В-третьих, остальные 21 из 23 вузов (кроме МГУ и РУДН) в 2020 г. не достигли ни одного из запланированных значений своих ключевых индикаторов позиций ни в одном из общих рейтингов ARWU, THE и QS [20–22].

В-четвертых, 8 вузов-участников (ДВФУ, ИТМО, Первый МГМУ им. Сеченова, РУДН, НИУ «Самарский университет», СФУ, ТюмГУ, ЮУрГУ), которые в своих дорожных картах заранее не предполагали вхождение в топ-100 хотя бы одного из общих рейтингов ARWU, THE и QS и не выполнили своих целевых индикаторов дорожных карт в 2020 г., в то же время получили целевым образом из государственного бюджета на повышение своей глобальной конкурентоспособности дополнительные субсидии общим объемом 19,415 млрд рублей из 80,1 млрд рублей (24%) из федерального бюджета Минобрнауки России. Заметим, что такая ситуация с получением и расходованием госбюджетных средств со стороны этих вузов-участников, Совета Проекта 5-100, Минобрнауки России и Правительства РФ может рассматриваться как нецелевое использование госбюджетных средств Проекта 5-100.

Важнейшей причиной неудовлетворительных результатов реализации Проекта 5-100 является низкое качество УР, принимаемых по Проекту на всех уровнях управления – от федерального до уровня вузов-участников, что привело к реализации, например, следующих рисков управления:

- *риск недостижения стратегических целей, которые зафиксированы в Указе Президента России, постановлениях Правительства РФ, распоряжениях Минобрнауки России, дорожных картах и программах развития до 2020 г. вузов – участников Проекта.* Заметим, что он реализовался на всех уровнях управления Проектом – от уровня Президента России (запланированное значение индикатора «не менее пяти российских университетов должно попасть в 2020 г. в первую сотню ведущих мировых университетов» не достигнуто) до уровня вузов-участников (21 вуз из 23 участников Проекта в 2020 г. не достигли запланированных значений своих ключевых индикаторов по позициям в общих рейтингах ARWU, THE и QS) [21–23];

- *риск неспособности ресурсного обеспечения приоритетного развития российской высшей школы.* Заметим, что он также реализовался на всех уровнях управления Проекта. В Указе Президента России не указан объем и источник ресурсного обеспечения Проекта. Правительство России не смогло обеспечить увеличение госбюджетных расходов на образование на период реализации Проекта и вынуждено было ежегодно изыскивать ресурсы за счет перераспределения госбюджетных средств, выделенных на всю систему российского образования. Это подтверждают данные о снижении доли государственных расходов на образование в ВВП с 4,4% в 2013 г. на момент начала реализации Проекта до 4,0% в 2020 г. на момент его окончания, а также данные об уменьшении доли расходов федерального бюджета на образование в ВВП с 1% в 2012 г. до 0,6% в 2020 г. [19]. За время реализации Проекта наблюдалось существенное сокращение базовых показателей развития российской системы высшего образования. Так, например, число государственных вузов снизилось с 653 до 497 (на 24%); контингент госбюджетных студентов – с 2619 тыс. чел. до 1905 тыс. чел. (на 27,3%); численность ППС в российских вузах – с 356,8 тыс. чел. до 223,1 тыс. чел.

(на 37,5%) [20]; численность аспирантов – на 40%, составив 93,5 тыс. человек, при этом резко уменьшилась доля выпускников аспирантуры с защитой диссертации в срок – она упала до 12% [24];

- *риск неспособности обеспечить качественное государственное управление российской высшей школой.* Заметим, что этот риск тоже реализовался на всех уровнях управления Проекта 5-100. Оценка качества управления Проектом на всех уровнях от федерального до вузовского, за исключением конкретного вуза – МГУ, признана «неудовлетворительной» [18];

- *риск неспособности создать благоприятную систему управления в российских вузах, которая способствовала бы развитию талантов и привлечению в них ведущих профессоров, ученых и одаренных обучающихся.* Заметим, что этот риск реализовался также на всех уровнях управления Проекта 5-100. Так, в указах Президента России предусмотрен переход на «эффективный контракт» в образовании, который, как показала практика, реально таковым не является. Также не выполнен индикатор «Увеличение к 2018 г. средней заработной платы преподавателей вузов, научных сотрудников до 200% от средней заработной платы в соответствующем регионе». Государственная программа РФ «Развитие образования на 2013–2020 гг.», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2012 г. № 2148-р, впервые с начала реформ предусматривала сокращение до 40% вузов и до 80% филиалов, а также повышение к 2018 г. соотношения числа студентов на одного преподавателя до 12:1. В Положении о порядке замещения должностей научно-педагогических работников, утвержденном приказом Минобрнауки России от 4 декабря 2014 г. № 1536, полностью отсутствует упоминание о роли кафедры, ученого совета факультета и ученого совета вуза в проведении конкурсного отбора на замещение должностей научно-педагогических работников (НПР). При этом одновременно значительно

возрастает роль администрации вуза в вопросах приема, увольнения и сокращения НПР вузов [23, 25, 26]; академический штат вузов – участников Проекта 5-100 лишился права избирать ректора своего вуза<sup>1</sup>.

## Заключение

Представленный подход к анализу управленческого решения на примере Проекта 5-100 показывает преимущества применения нечетко-логических и нейросетевых методов к оценке объектов, описываемых разнородными, трудно формализуемыми характеристиками, среди которых:

- сочетание простоты использования, свойственной методам качественной оценки, с возможностью получения количественных результатов;

- сочетание простоты использования качественных (вербальных) оценок, с одной стороны, и возможности получения на их основе количественных результатов, с другой стороны;

- возможность преобразования совокупности вербальных оценок качества управленческих решений в итоговую количественную оценку;

- наглядность представления результатов;
- широкие возможности автоматизации и тиражирования результатов.

Как показало исследование, методы интеллектуального анализа данных могут эффективно использоваться как для первичной оценки качества принимаемых управленческих решений, так и для динамического контроля уровня их выполнимости.

В приведенном примере анализа Проекта 5-100 с помощью нейросетевого метода кластеризации было установлено, что по состоянию на 2012 г. возможность успешного исполнения целей Проекта отсутствовала.

<sup>1</sup> См. п. 1.6 и 4.56 Устава МФТИ, утвержденного приказом Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 1385.

Построение комплекса систем нечеткого вывода позволило учитывать в модели оценки успешности реализации Проекта на уровне всей российской высшей школы факторы и показатели, значения которых могут быть представлены только в виде экспертных мнений, выраженных в нечисловой форме. Результат реализации алгоритма нечеткого вывода для экспертных оценок и показателей по состоянию на 2012 г. сформировал интегральную оценку выполнимости Проекта 5-100 на уровне 2,36 балла, что соответствует «низкому» уровню возможности его исполнения. Это полностью подтверждает авторскую

гипотезу 2014 г. о невозможности достижения целей Проекта на всех уровнях управления – от федерального до уровня вуза – участника Проекта.

В целом сравнительный анализ реальных результатов реализации Проекта 5-100 и их прогноза средствами интеллектуального анализа данных подтверждает целесообразность применения этих методов в государственной образовательной политике и практике оценки возможностей осуществления любых крупномасштабных проектов в будущем, в частности связанных с развитием российской системы высшего образования.

### Список литературы

1. *Salmi J., Froumin I.* Excellence initiatives to establish worldclass universities: Evaluation of recent experiences // *Educational Studies Moscow*. 2013. No. 1. P. 25–69. DOI: 10.17323/1814-9545-2013-1-25-68.
2. *Meleshkin M. I.* On prospects of Russia's higher education institutions' entering the top 100 world leading universities according to the Times Higher Education ranking // *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2014. No. 19 (370). P. 56–62.
3. *Розовски Г.* Исследовательские университеты: американская исключительность? // *Вопросы образования*. 2014. № 2. С. 8–19.
4. *Забоев М. В., Мелешкин М. И.* Оценка перспектив вхождения российских университетов в первую сотню ведущих мировых университетов с использованием нейросетевых методов кластеризации данных // *Прикладная информатика*. 2015. Т. 10. № 3 (57). С. 52–61.
5. *Paleari S., Donina D., Meoli M.* The role of the University in twenty-first century European society // *The Journal of Technology Transfer*. 2015. No. 40 (3). P. 369–379. DOI: 10.1007/s10961-014-9348-9.
6. *Zaboev M., Meleshkin M., Khalin V.* Evaluation of current location and prospects of the European and Russian universities among the world's leading universities with the use of neural network methods clustering of data // *Proceedings of the International Conference on New Challenges of Economic and Business Development – 2016: Society, Innovations and Collaborative Economy, Riga, May 12–14. University of Latvia, 2016. P. 928–936.*
7. *Douglass J.* The new Flagship University: Changing the paradigm from global ranking to national relevancy. – 1st edition. – London, UK: Palgrave Macmillan, 2016. – 256 p.
8. *The global academic rankings game: Changing institutional policy, practice, and academic life / ed. by M. Yudkevich, P. G. Altbach, L. E. Rumbley. – N.Y.: Routledge, 2016. – 314 p.*
9. *Глобальная конкурентоспособность ведущих университетов: модели и методы ее оценки и прогнозирования / под общ. ред. В. Г. Халина. – М.: Проспект, 2018. – 544 с.*
10. *Froumin I., Lisyutkin M.* The State as the Driver of Competitiveness in Russian higher education: The case of project 5-100. – In: *International status anxiety and higher education: Soviet legacy in China and Russia. – Hong Kong: CERC-Springer, 2018. P. 237–257.*
11. *Другова Е. А., Плешкевич И. Б., Климова Т. В.* Трансформация кадровой политики российских университетов – участников Проекта 5-100: кейс НИЯУ МИФИ // *Высшее образование в России*. 2021. Т. 30. № 6. С. 9–26. DOI: 10.31992/0869-3617-2021-30-6-9-26.
12. *Зайцев Д. А.* Экзамен для экзаменаторов – Счетная палата оценила результаты Проекта 5-100 // *Бюджет*. 2021. № 3 (219). С. 76–79.
13. *Теория принятия решений: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры: в 2 т. / под ред. В. Г. Халина. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 711 с.*
14. *Khalin V. G., Chernova G. V., Yurkov A. V., Zaboev M. V.* Systemic risks of government control over large-scale projects in the development of the Russian higher school. – In: *System Analysis in Engineering and Control (SAEC 2021). Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Cham., 2022. P. 525–537. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6\_46.*

15. Чернова Г. В. Кудрявцев А. А. Управление рисками: учебное пособие. – М.: ТК Велби: Проспект, 2007. – 160 с.
16. Управление финансовыми рисками высшего профессионального образования России в условиях его модернизации: в 2 кн. / под общ. ред. В. И. Гришина, науч. ред. И. П. Хоминич. – М.: ФГБОУ ВПО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2014. – 660 с.
17. Сайт Проекта 5-100. Раздел документы [Электронный ресурс]. URL: <https://5top100.ru/documents/regulations/> (дата обращения: 15.06.2022).
18. Чернова Г. В., Халин В. Г. Проект «5 в 100»: системные риски государственного управления и их реализация // Управление риском. 2021. № 2 (98). С. 3–15.
19. Образование в цифрах: 2021: краткий статистический сборник / Л. М. Гохберг, О. К. Озерова, Е. В. Саутина; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2021. – 132 с.
20. Rankings // ARWU. URL: <http://www.shanghairanking.com/> (дата обращения: 15.06.2022).
21. QS World University Rankings // QS. URL: <https://www.topuniversities.com/university-rankings/world-university-rankings/> (дата обращения: 15.06.2022).
22. World University Rankings // THE. URL: <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings> (дата обращения: 15.06.2022).
23. Российские университеты в условиях цифровизации: математические и инструментальные методы оценки качества управления: монография / под общ. ред. В. Г. Халина. – М.: Проспект, 2019. – 896 с.
24. Торкунов А. В. Университет как часть национальной экономики // Вопросы экономики. 2019. № 12. С. 111–122. DOI: 10.32609/0042-8736-2019-12-111-122.
25. Курбатова М. В., Левин С. Н. Эффективный контракт в системе высшего образования РФ: теоретические подходы и особенности институционального проектирования // Журнал институциональных исследований. 2013. Т. 5. № 1. С. 55–80.
26. Балацкий Е. В. Управленческие парадоксы реформ в университетском секторе // Журнал Новой экономической ассоциации. 2015. № 2 (26). С. 124–149.

### Сведения об авторах

Забоев Михаил Валерьевич, ORCID 0000-0002-7443-6603, канд. экон. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, [m.zaboev@spbu.ru](mailto:m.zaboev@spbu.ru)

Халин Владимир Георгиевич, ORCID 0000-0003-1459-3137, докт. экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, [v.halin@spbu.ru](mailto:v.halin@spbu.ru)

Чернова Галина Васильевна, ORCID 0000-0003-4050-4046, докт. экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, [g.chernova@spbu.ru](mailto:g.chernova@spbu.ru)

Юрков Александр Васильевич, ORCID 0000-0002-2151-6247, докт. физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, [a.v.yurkov@spbu.ru](mailto:a.v.yurkov@spbu.ru)

Статья поступила 24.06.2022, рассмотрена 12.07.2022, принята 18.08.2022

### References

1. Salmi J., Froumin I. Excellence initiatives to establish worldclass universities: Evaluation of recent experiences. Educational Studies Moscow, 2013, no.1, pp.25-69. DOI: 10.17323/1814-9545-2013-1-25-68.
2. Meleshkin M. I. On prospects of Russia's higher education institutions' entering the top 100 world leading universities according to the Times Higher Education ranking. Economic Analysis: Theory and Practice, 2014, no.19(370), pp.56-62.
3. Rozovsky G. *Issledovatel'skie universitety: amerikanskaya isklyuchitel'nost'*? [Research Universities: American Exceptionalism?]. *Voprosy obrazovaniya*=Educational Studies Moscow, 2014, no.2, pp.8-19.
4. Zaboev M., Meleshkin M. Evaluation of the prospects Russian universities to be among the first hundred of the world's leading universities with the use of neural network methods clustering of data. *Prikladnaya Informatika*=Journal of Applied Informatics, 2015, vol.10. no.3(57), pp.52-61 (in Russian).
5. Paleari S., Donina D., Meoli M. The role of the University in twenty-first century European society. The Journal of Technology Transfer, 2015, no.40(3), pp.369-379. DOI: 10.1007/s10961-014-9348-9.
6. Zaboev M., Meleshkin M., Khalin V. Evaluation of current location and prospects of the European and Russian universities among the world's leading universities with the use of neural network methods clustering of data. Proceedings of the International Conference on New Challenges of Economic and Business Development – 2016: Society, Innovations and Collaborative Economy, Riga, May 12-14, University of Latvia, 2016, pp.928-936.
7. Douglass J. The new Flagship University: Changing the paradigm from global ranking to national relevancy. 1st edition. London, UK, Palgrave Macmillan, 2016, 256 p.

8. The global academic rankings game: Changing institutional policy, practice, and academic life. Ed. by M. Yudkevich, P. G. Altbach, L. E. Rumbley. N.Y., Routledge, 2016, 314 p.
9. The global competitiveness of leading universities: models and methods for estimating and forecasting. Ed. by V. Khalin. Moscow, *Prospect* Publ., 2018, 544 p. (in Russian).
10. Froumin, I. Lisytukin, M. The State as the Driver of Competitiveness in Russian higher education: The case of project 5-100. In: International status anxiety and higher education: Soviet legacy in China and Russia. Hong Kong, CERC-Springer, 2018, pp.237-257.
11. Drugova E. A., Pleshkevich I. B., Klimova T. V. Transformation of the personnel policy of Russian Universities participating in Project 5-100: The case of National Research Nuclear University MEPhI. *Vyshee obrazovanie v Rossii*=Higher Education in Russia, 2021, vol.30, no.6, pp.9-26 (in Russian). DOI: 10.31992/0869-3617-2021-30-6-9-26.
12. Zaitzev D. *Ekzamen dlya ekzamenatorov – Schetnaya palata otsenila rezul'taty Proekta 5-100* [Examination for examiners – the Accounts Chamber evaluated the results of Project 5-100]. *Byudzhet*, 2021, no.3(219), pp.76-79.
13. *Teoriya prinyatiya reshenii: uchebnik i praktikum dlya bakalavriata i magistratury: v 2 t.* [Theory of decision making: textbook and workshop for undergraduate and graduate students: in 2 vol.]. Ed. by V. Khalin. Moscow, *Izdatel'stvo Yurait* Publ., 2016, 711 p.
14. Khalin V. G., Chernova G. V., Yurkov A. V., Zaboiev M. V. Systemic risks of government control over large-scale projects in the development of the Russian higher school. In: System Analysis in Engineering and Control (SAEC 2021). Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham., 2022, pp.525-537. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6\_46.
15. Chernova G. V., Kudryavtsev A. A. *Upravlenie riskami: uchebnoe posobie* [Risk management: textbook]. Moscow, *TK Velbi, Prospekt* Publ., 2007, 160 p.
16. *Upravlenie finansovymi riskami vysshego professional'nogo obrazovaniya Rossii v usloviyakh ego modernizatsii: v 2 kn.* [Management of financial risks of higher professional education in Russia in the context of its modernization: in 2 books]. Ed. by V. I. Grishin, I. P. Khomich. Moscow, Plekhanov Russian University of Economics Publ., 2014, 660 p.
17. *Sait Proekta 5-100. Razdel dokumenty* [5-100 Russian Academic Excellence Project. Documents]. Available at: <https://5top100.ru/documents/regulations> (accessed 15.06.2022).
18. Chernova G. V., Khalin V. G. Project "5 in 100": system risks of the state management and their implementation. *Upravlenie riskom*, 2021, no.2(98), pp.3-15 (in Russian).
19. *Obrazovanie v tsifrakh: 2021: kratkii statisticheskii sbornik* [Education in figures: Pocket data book] / L. M. Gokhberg, O. K. Ozerova, E. V. Sautina. Moscow, National Research University Higher School of Economics Publ., 2021, 132 p.
20. Rankings. ARWU. Available at: <http://www.shanghairanking.com/> (accessed 15.06.2022).
21. QS World University Rankings. QS. Available at: <https://www.topuniversities.com/university-rankings/world-university-rankings/> (accessed 15.06.2022).
22. World University Rankings. THE. Available at: <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings> (accessed 15.06.2022).
23. *Rossiiskie universitety v usloviyakh tsifrovizatsii: matematicheskie i instrumental'nye metody otsenki kachestva upravleniya: monografiya* [Russian universities in the context of digitalization: mathematical and instrumental methods for assessing the quality of management: monograph]. Ed. by V. Khalin. Moscow, *Prospect* Publ., 2019, 896 p.
24. Torkunov A. V. University as a part of national economy. *Voprosy Ekonomiki*, 2019, no.12, pp.111-122 (in Russian). DOI: 10.32609/0042-8736-2019-12-111-122.
25. Kurbatova M. V., Levin S. N. Effective contract in higher education of the Russian Federation: theoretical approaches and features of institutional design. *Zhurnal institucional'nykh issledovaniy*=Journal of Institutional Studies, 2013, vol.5, no.1, pp.55-80 (in Russian).
26. Balatsky E. V. Managerial paradoxes of reform in Russian University sector. *Zhurnal novej jekonomicheskoy associacii*=The Journal of the New Economic Association, 2015, no.2(26), pp.124-149.

### About the authors

*Mikhail V. Zaboiev*, ORCID 0000-0002-7443-6603, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, [m.zaboiev@spbu.ru](mailto:m.zaboiev@spbu.ru)

*Vladimir G. Khalin*, ORCID 0000-0003-1459-3137, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, [v.khalin@spbu.ru](mailto:v.khalin@spbu.ru)

*Galina V. Chernova*, ORCID 0000-0003-4050-4046, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, [g.chernova@spbu.ru](mailto:g.chernova@spbu.ru)

*Alexander V. Yurkov*, ORCID 0000-0002-2151-6247, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, [a.v.yurkov@spbu.ru](mailto:a.v.yurkov@spbu.ru)

Received 24.06.2022, reviewed 12.07.2022, accepted 18.08.2022

# Моделирование взаимодействия интеллектуальных агентов в мультиагентной системе управления городским парковочным пространством

Г. В. Рыбина<sup>1</sup>, В. Ю. Степаньков<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «СМАРТ-ТЕХ», Москва, Россия

\*vstepankov@gmail.com

**Аннотация.** Рассматриваются возможности мультиагентного подхода для управления городским парковочным пространством, который позволяет адекватно представить парковочное пространство и эффективно решать задачи мониторинга загруженности, поиска и бронирования доступных парковочных мест; построения маршрутов и навигации до выбранных мест; парковки автомобилей; оплаты услуг паркования; контроля соблюдения правил парковки; контроля и управления доступом на закрытых парковках; прогнозирования основных параметров, таких как загруженность, доход, оборачиваемость; информирование пользователей. Обоснована необходимость интеллектуализации процессов управления городским парковочным пространством на базе использования методов и технологий мультиагентных систем (МАС), основные цели которой заключаются в сокращении времени поиска мест для парковок; повышении скорости движения в зонах платной парковки; увеличении оборачиваемости парковочных мест; снижении заторов на дорогах, затрат на топливо; снижении количества нарушений правил парковки на улично-дорожной сети; сокращении потоков личного автотранспорта, въезжающего в пределы платной зоны, и стимулировании использования городского общественного транспорта; уменьшении загрязнения окружающей среды. Наибольшую сложность представляют задачи организации взаимодействия агентов различной типологии при коллективном решении задач, поскольку каждый агент, решающий конкретную задачу, имеет лишь частичное представление об общей задаче и должен постоянно взаимодействовать с другими агентами. Представлены особенности прототипирования МАС с акцентом на моделирование взаимодействия отдельных типов интеллектуальных агентов в исследуемой проблемной области. Полученные результаты моделирования являются основой для продолжения и дальнейшего развития исследований и разработок по созданию финального прототипа МАС для управления городским парковочным пространством.

**Ключевые слова:** мультиагентная система, взаимодействие интеллектуальных агентов, имитационное моделирование, управление городским парковочным пространством, умный город

**Для цитирования:** Рыбина Г. В., Степаньков В. Ю. Моделирование взаимодействия интеллектуальных агентов в мультиагентной системе управления городским парковочным пространством // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 37–46. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-37-46

# The simulation of intelligent agents communication in the multi-agent management system for urban parking space

G. Rybina<sup>1</sup>, V. Stepankov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>2</sup> SMART-TECH Ltd, Moscow, Russia

\* vstepankov@gmail.com

**Abstract.** The possibilities of a multi-agent approach for managing urban parking space are considered, which allows you to adequately represent the parking space and effectively solve the following tasks: monitoring congestion, searching and booking available parking spaces; building routes and navigation to selected places; parking; payment for parking services; monitoring compliance with parking rules; control and access control in closed parking lots (equipped with entrance and exit terminals and barriers); forecasting the main parameters, such as workload, income, turnover; informing users. The necessity of intellectualization of urban parking space management processes based on the use of methods and technologies of multi-agent systems (MAS), the main objectives of which are to: reduce the search time for parking spaces; increase the speed of traffic in paid parking areas; increase the turnover of parking spaces; reduce traffic congestion, fuel costs; reduce the number of parking violations on the road network; reducing the flow of personal vehicles entering the toll zone and stimulating the use of urban public transport; reducing environmental pollution. The greatest difficulty is the tasks of organizing the interaction of agents of various typologies in the collective solution of tasks, since each agent solving a specific task has only a partial idea of the overall task and must constantly interact with other agents. The features of prototyping MAS with an emphasis on modeling the interaction of certain types of intelligent agents in the problem area under study are presented. The obtained simulation results are the basis for the continuation and further development of research and development to create the final prototype of a MAS for urban parking space management.

**Keywords:** multi-agent system, interactions of intelligent agents, simulation modeling, urban parking space management, smart city

**For citation:** Rybina G., Stepankov V. The simulation of intelligent agents communication in the multi-agent management system for urban parking space. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.37-46 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-37-46

## Введение

Основными направлениями цифровизации городского управления транспортом, жилищно-коммунальным хозяйством, здравоохранением и другими социальными секторами в настоящее время являются реинжиниринг, автоматизация и интеллектуализация. Для этих целей широкое использование получили подходы к созданию сложных программных систем в быстроменяющихся

проблемных областях (например, CORE [1]) и в сфере Интернета вещей IoT [2], технологии работы с большими данными (Big Data), методы и технологии построения интеллектуальных систем с различной архитектурной типологией [3], в том числе интегрированные экспертные системы [4], многоагентные системы [5].

Управление городским (муниципальным) парковочным пространством является одной из наиболее сложных задач, характеризующейся автономностью, многообразием функ-

ций управления, динамичным изменением требований потребителей. Это требует интеграции самых современных подходов и технологий построения динамических интеллектуальных систем с методами системного анализа, онтологического инжиниринга, интеллектуального планирования и технологии программирования [3].

В данной работе рассматриваются возможности мультиагентного подхода для управления городским парковочным пространством, который позволяет адекватно представить парковочное пространство и эффективно решать задачи мониторинга загруженности, поиска и бронирования доступных парковочных мест; построения маршрутов и навигации до выбранных мест; парковки автомобилей; оплаты услуг паркования; контроля соблюдения правил парковки; контроля и управления доступом на закрытых парковках (оборудованных въездными и выездными терминалами и шлагбаумами); прогнозирования основных параметров, таких как загруженность, доход, оборачиваемость; информирование пользователей [6].

При этом мультиагентная система (МАС) управления должна обеспечивать: снижение количества нарушений правил парковки на улично-дорожной сети; повышение скорости движения в зонах платной парковки; увеличение оборачиваемости парковочных мест; сокращение потоков личного автотранспорта, въезжающего в пределы платной зоны, и стимулирование использования городского общественного транспорта. Особое внимание требуется уделить социальным функциям (обеспечение парковочными местами лиц с ограниченными возможностями, управление зонами парковки вблизи социальных объектов) [7]. Кроме этого, все большее значение приобретают управление процессами парковки для электрических автомобилей [8], организации временного хранения подключенного и беспилотного транспорта [9].

Проблемная область (ПрО) управления парковочным пространством остается мало-

исследованной как с точки зрения постановки задачи, так и с позиции возможных методов решения и использования соответствующих инструментальных средств. Недостаточно исследованы современные тенденции в области развития автомобильного транспорта с точки зрения автономности и беспилотной эксплуатации, поведения групп подвижных объектов, координации движения, возможных инцидентов [10].

Наибольшую сложность представляют задачи организации взаимодействия агентов различной типологии при коллективном решении задач, поскольку каждый агент, решающий конкретную подзадачу, имеет лишь частичное представление об общей задаче и должен постоянно взаимодействовать с другими агентами.

В лаборатории «Интеллектуальные системы и технологии» кафедры кибернетики НИЯУ МИФИ накоплен опыт исследований и разработок в области МАС, в том числе создана система имитационного моделирования взаимодействия интеллектуальных агентов (ИМВИА) [3, 11, 12]. Данная система используется в качестве инструментальной среды поддержки разработки МАС для различных ПрО и последующей оценки решений и качества функционирования имитируемой МАС и отдельных компонентов.

Поскольку при использовании ИМВИА основными объектами моделирования являются все компоненты предложенной базовой модели взаимодействия, то система ИМВИА была выбрана в качестве инструмента исследований при создании МАС для данной ПрО.

## **Эволюция подходов к разработке систем управления городским парковочным пространством: от автоматизации к интеллектуализации**

Муниципальное парковочное пространство изначально регламентировалось только

правилами дорожного движения и знаками. В 30-е годы XX века количество автомобилей в США достигло того уровня, когда спрос на парковочные места превысил предложение и дополнительным регулятором в функционировании муниципального парковочного пространства стала обязательная оплата за пользование парковочными местами. В 1935 году в Оклахома-Сити был введен в эксплуатацию первый паркомат [13].

Долгое время концепция управления парковочным пространством с помощью тарифной политики с использованием паркоматов, ограничивающей спрос на парковку, преобладала во всем мире. Затем из индивидуальных «парковочных счетчиков» паркоматы эволюционировали в терминалы, обслуживающие десятки и сотни парковочных мест. Появились дополнительные возможности по идентификации транспортных средств по номеру, что дало возможность ввести динамическую тарификацию, зависящую от продолжительности сессии стоянки. Тем не менее функции автоматизированной системы управления не выходили за рамки сети паркоматов. Доступность мобильной связи позволила реализовать функцию оплаты парковки по СМС и с помощью USSD-команд [14].

С появлением смартфонов подход к управлению парковочным пространством стал существенным образом меняться, а мобильные приложения стали новым интерфейсом взаимодействия пользователей с парковочным пространством. Пользователям это принесло ощутимые бонусы в виде возможностей запускать и останавливать парковочную сессию удаленно без необходимости пользоваться паркоматом, а также в виде функций поиска, бронирования и построения маршрутов к оптимальному месту парковки. Системам управления парковочным пространством мобильные приложения позволили получать дополнительные массивы больших данных для анализа, прогнозирования и выработки перспективных управляющих сигналов.

Таким образом, с появлением новых подходов к автоматизации стало возможным управлять загрузкой парковочного пространства не только тарифами, но и ограничением допустимого времени пребывания на парковочном месте и ограничением на въезд в определенную парковочную зону в определенное время суток. Как правило, в этих системах управления используется настраиваемая комбинация всех трех указанных базовых ограничений [15].

В целом программная реализация большинства современных систем управления городским парковочным пространством базируется на клиент-серверной технологии. Клиенты (оборудование, платежные и информационные мобильные приложения, веб-порталы, личные кабинеты) осуществляют обмен данными с серверной частью системы, расположенной в частном или коммерческом облаке, через программные интерфейсы, т. е. используется в основном централизованный архитектурный подход. Здесь описание объекта управления, цели, правила поведения и анализ состояния проводится централизованно после поступления данных с периферийных устройств и от пользователей системы, однако в перспективе это будет существенным недостатком, так как если услуга парковки оказывается беспилотному автомобилю, то система имеет неприемлемо низкий уровень автономности.

Исходя из этого более перспективным представляется использование децентрализованного агентно-ориентированного подхода к проектированию и разработке архитектуры системы управления парковочным пространством в виде МАС, что позволит в том числе решить проблему автономного управления, так как агенты благодаря сенсорам различной модальности получают информацию о среде, в которой функционируют, имеют собственные цели и действуют самостоятельно в течение продолжительного периода времени [5].

## Общая характеристика интеллектуальных агентов для управления городским парковочным пространством

Обобщенное представление предлагаемой архитектуры MAS для управления городским парковочным пространством представлено на рисунке 1. В качестве модели интеллектуального агента и модели их взаимодействия были адаптированы модели, предоставляемые системой ИМВИА с учетом особенностей Про и решаемых задач.

Рассмотрим на концептуальном уровне основные функции выделенных типов интеллектуальных агентов, связанные с решением комплекса задач, определяющих базовые и новые возможности эффективного управления городским парковочным пространством.

На данном этапе исследований проведено имитационное моделирование взаимодействия трех типов интеллектуальных агентов (далее – агентов), а именно: агент-водитель

(АВ), агент-администратор (АА) и агент-диспетчер парковочного пространства (ДПП).

## Задачи водителя на парковке и функции агента типа АВ

Базовый набор действий водителя для нахождения места на парковке без использования мобильного приложения включает визуальное использование информационно-навигационных уличных табло и выбор направления движения к той парковке, на которой есть свободные места. В случае использования мобильного приложения есть возможность усложнить критерии поиска свободного места, добавив дополнительные параметры: стоимость времени парковки, расстояние от парковки до конечного места назначения. На карте отображаются все парковки с их стоимостью на запрашиваемый интервал времени и визуально показано расстояние от парковки до выбранного конечного места назначения. Следующими действиями будут: запуск парковочной сессии; остановка или прод-



Рис. 1. Архитектура прототипа MAS для управления городским парковочным пространством

Fig. 1. The architecture of the prototype MAS for urban parking space management

ление парковочной сессии; оплата парковки в соответствии с действующим тарифом.

Функции, выполнение которых дополнительно возлагается на агента типа АВ, связаны с решением рассмотренных ниже задач.

Во-первых, если водитель не пользуется мобильным приложением, то он может найти свободное место только в тех парковочных зонах, которые оборудованы парковочными датчиками и информационными дисплеями. Найти место с учетом дополнительных критериев поиска или в зоне, которая не оборудована уличной системой информирования о свободных местах, невозможно. Для решения данной проблемы разрабатывается мобильное приложение, позволяющее получить более полную информацию.

Во-вторых, водитель, как правило, испытывает нехватку времени для выполнения рутинных операций, поэтому задача поиска парковки решается уже после момента начала движения. Выполнение оптимального поиска с учетом дополнительных критериев с помощью мобильного приложения связано с риском создания аварийной ситуации из-за отвлечения внимания водителя на экран смартфона.

Таким образом, агент типа АВ, действуя в интересах водителя, решает описанные задачи с минимальным вовлечением водителя в данный процесс, причем от водителя он получает только точку конечного назначения, например конкретный адрес или название объекта. В процессе функционирования АВ взаимодействует с агентом типа ДПП, получает от него предложения, оценивает их согласно своим критериям оценки предложений. Кроме того, АВ самостоятельно оплачивает, продлевает и заканчивает парковочные сессии на выбранных парковках.

### **Задачи администратора и функции агента типа АА**

Базовый набор действий администратора заключается в выявлении нарушителя правил парковки и фиксации нарушения. Этот про-

цесс связан с интервальным обходом зоны парковки и последовательной проверкой каждого транспортного средства, находящегося в ней. В случае повторной фиксации определенного автомобиля в зоне парковки без запущенной парковочной сессии выписывается штраф.

Такой процесс имеет серьезное ограничение по количеству транспортных средств, которые могут быть проверены в рамках одного интервала, что накладывает ограничение на размер парковочной зоны, которая может быть проверена одним администратором парковочного пространства.

Целью действий агента типа АА является оптимизация маршрутов движения администратора за счет исключения из них парковок, которые не требуют проверки (например, путем исключения из маршрута обхода тех парковок, где количество занятых мест равно количеству оплаченных мест), выявление машин без оплаты и т. п., что в целом способствует экономии времени, расширению зоны контроля, доступной одному администратору, и фиксации большего количества нарушений.

АА подчиняется ДПП и взаимодействует с ним по схеме «запрос – ответ». АА запрашивает у ДПП состояние определенной парковки, т. е. загруженность и количество активных парковочных сессий. В ответ ДПП отправляет АА актуальную информацию о парковке. На базе текущих данных, полученных от ДПП, АА оптимизирует маршруты обхода парковочного пространства и исключает из маршрутов парковки, на которых не может быть нарушений. Дополнительно АА информирует ДПП о своем местоположении с передачей ГЛОНАСС-координат и отправляет список парковок, контролируемых администратором в текущий момент времени. ДПП использует полученные данные для мониторинга работы администраторов и оценки полноты зоны контроля. ДПП динамически перераспределяет нагрузку на администраторов, сужая или расширяя зону контроля определенного администратора.

## Задачи диспетчера парковочного пространства и функции агента типа ДПП

Базовый набор действий диспетчера парковочного пространства связан с решением совокупности следующих задач: максимизация прибыли городского парковочного пространства; снижение трафика автомобилей на городской улично-дорожной сети; борьба с завышением тарифов на закрытых парковках в условиях экстремально низкого количества предложений парковочных мест; равномерная загрузка парковок внутри парковочных зон.

Здесь следует выделить несколько особенностей, которые влияют на характер взаимодействия агентов типа АВ и ДПП, отражающих противоположные интересы водителей и диспетчера. Сегодня организация парковочных пространств предусматривает наличие общей базы данных парковочных мест и мобильных приложений, которые отображают полный список парковок со статусом их загрузки и стоимостью за указанный интервал времени. Как было показано выше, все задачи по выбору парковки отдаются на откуп водителю, и при наличии полной информации о парковках водитель может решить свои задачи, но задачи города при этом решаются плохо.

Поэтому важной функцией ДПП является нахождение взаимовыгодного компромисса путем содержательного (смыслового) взаимодействия с АВ для поиска оптимальных решений как для водителя, так и для города с учетом настроенных критериев и их весов. Например, две парковки находятся рядом, но на них действуют разные тарифы (одна из них значительно дороже). Водители стараются сэкономить и паркуются на дешевой парковке, приводя к ее перегрузке и возникновению очередей. Трафик на данной улице существенно увеличивается, в то время как парковка рядом загружена менее чем на 50%. В данном случае ДПП может исключить из предлагаемых вариантов первую парковку, а предлагать АВ только свободную, но более

дорогую парковку. Возможен и обратный вариант, когда дорогие парковки в центре города загружены близко к 100%, и ДПП может предлагать более дешевые парковки на некотором удалении от центра города. Такой подход позволяет находить компромиссные решения и решать задачи водителя и города путем организации взаимодействия агентов различных типов.

## Особенности моделирования взаимодействия интеллектуальных агентов

Как было отмечено выше, с целью исследования основных проектных решений при прототипировании архитектур агентов в МАС проводилось имитационное моделирование взаимодействия агентов с использованием средств системы ИМВИА. Следует отметить, что МАС для данной ПрО как объект моделирования обладает всеми характерными чертами, а именно: большое число параметров, неполнота знаний отдельного агента об окружении, потенциальная недетерминированность окружения, распределенность, функционирование в реальном времени и др. [16, 17].

Эти свойства, а также размерности решаемых агентами задач и слабая формализуемость вышеперечисленных процессов и задач управления городским парковочным пространством показали необходимость и обоснованность использования именно имитационного моделирования взаимодействия интеллектуальных агентов на основе реализованной и поддерживаемой средствами ИМВИА обобщенной модели взаимодействия, детальное описание которой приводится в [3, 11, 12].

Следует отметить, что основными объектами моделирования в среде ИМВИА являлись следующие компоненты обобщенной модели взаимодействия: архитектура агента; ПрО (в данном случае ПрО соответствует коммуникативной среде); глобальная, тематическая и локальная структуры взаимодействия агентов; язык взаимодействия (диалект

языка KQML) [18]; транспортный уровень взаимодействия.

Использовался также специальный графический язык описания сценариев имитационных экспериментов [11, 12], позволяющий исследовать все компоненты архитектуры агента (сенсор, эффектор, база целей, база планов, база действий, рефлектор, планировщик) с точки зрения влияния изменений моделей окружения агентов на восприятие и ответные реакции.

## Заключение

Интеллектуализация процессов управления городским парковочным пространством

на базе использования методов и технологий МАС является новым подходом, основные цели которого заключаются в сокращении времени поиска мест для парковок, в снижении затрат на дорогах, затрат на топливо, в уменьшении загрязнения окружающей среды.

В данной работе описаны особенности прототипирования МАС с акцентом на моделирование взаимодействия отдельных типов интеллектуальных агентов в исследуемой ПрО. Полученные результаты моделирования являются основой для продолжения и дальнейшего развития исследований и разработок по созданию финального прототипа МАС для управления городским парковочным пространством.

## Список литературы

1. *Hamdi M. S., Ghannem A., Loucopoulos P., Kavakl E., Ammar H.* Intelligent parking management by means of capability oriented requirements engineering. – In: *Advances and trends in artificial intelligence. From theory to practice. IEA/AIE 2019. Lecture Notes in Computer Science / ed. by F. Wotawa, G. Friedrich, I. Pill, R. Koitz-Hristov, M. Ali.* – Springer, Cham., 2019. Vol. 11606. P. 158–172. DOI: 10.1007/978-3-030-22999-3\_15.
2. *Arun A.* Architecting IoT for smart cities. – In: *Smart Cities in Application / ed. by S. McClellan.* – Springer, Cham., 2020. P. 141–152. DOI: 10.1007/978-3-030-19396-6\_8.
3. *Рыбина Г. В.* Интеллектуальные системы: от А до Я. Серия монографий: в 3 кн. Кн. 2. Интеллектуальные диалоговые системы. Динамические интеллектуальные системы. – М.: Научтехлитиздат, 2015. – 164 с.
4. *Рыбина Г. В.* Теория и технология построения интегрированных экспертных систем. – М.: Научтехлитиздат, 2008. – 432 с.
5. *Тарасов В. Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: УРСС, 2002. – 352 с.
6. *Филатов В. В., Анфимова А. Ю., Новицкий И. Ю., Голованов В. И., Фадеев А. С.* Особенности управления парковочным пространством в мегаполисе // *Науковедение.* 2015. Т. 7. № 5 (30). С. 2–23. DOI: 10.15862/133EVN515.
7. *Styrin E., Kostyrko A.* Implementing smart services in Moscow: The integrated mobile platform. – In: *Smarter as the new urban agenda: A comprehensive view of the 21st century city.* – N.Y., Heidelberg: Springer, 2016. P. 225–241. DOI: 10.1007/978-3-319-17620-8\_12.
8. *Ripan T., Ganguly S.* Energy management at municipal parking deck for charging of Plug-in hybrid electric vehicles // *Proceedings of the IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS).* 2014. P. 1–5. DOI: 10.1109/SCEECS.2014.6804482.
9. *Tariq Sh., Choi H., Park H., Lee J. W.* Efficient parking control algorithms for self-driving cars // *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions (IJITST).* 2019. Vol. 9. No. 3. P. 332–352. DOI: 10.1504/IJTST.2019.10023434.
10. *Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В.* Прикладные многоагентные системы группового управления // *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2009. № 2. С. 3–24.
11. *Рыбина Г. В., Паронджанов С. С.* Моделирование процессов взаимодействия интеллектуальных агентов в многоагентных системах // *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2008. № 3. С. 22–29.
12. *Рыбина Г. В., Паронджанов С. С.* Система ИМВИА и ее применение для построения многоагентных систем // *Программные продукты и системы.* 2009. № 4. С. 43–48.
13. *Thuesen G. J., Sullivan W. G.* Engineering economy – a historical perspective. Georgia Institute of Technology / Virginia Polytechnic Institute and State University, 1984 // *Docslib.org.* URL: <https://docslib.org/doc/5003168/engineering-economy-a-historical-perspective> (дата обращения: 09.08.2022).

14. Менн А., Петров Е. Интеллектуальные системы управления парковочным пространством // Транспортная стратегия – XXI век. 2017. № 36. С. 22–23.
15. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
16. Рассел С., Норвинг П. Искусственный интеллект: современный подход. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 1408 с.
17. Russell S. Rationality and intelligence: A brief update. – In: Fundamental issues of Artificial intelligence (synthese library) / ed. by Vincent C. Müller. – Berlin: Springer, 2014. P. 7–28. DOI: 10.1007/978-3-319-26485-1\_2.
18. Shaveta J., Amandeep K. KQML – From scenario to Technology // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 30–34.

### Сведения об авторах

Рыбина Галина Валентиновна, ORCID 0000-0003-2564-2299, докт. техн. наук, профессор, Институт интеллектуальных кибернетических систем, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, gvrybina@mephi.ru

Степаньков Владимир Юрьевич, ORCID 0000-0003-0783-000X, генеральный директор ООО «СМАРТ-ТЕХ», Москва, Россия, vstepankov@gmail.com

Статья поступила 18.05.2022, рассмотрена 03.06.2022, принята 20.06.2022

### References

1. Hamdi M. S., Ghannem A., Loucopoulos P., Kavakl E., Ammar H. Intelligent parking management by means of capability oriented requirements engineering. In: Advances and trends in artificial intelligence. From theory to practice. IEA/AIE 2019. Lecture Notes in Computer Science. Ed. by F. Wotawa, G. Friedrich, I. Pill, R. Koitz-Hristov, M. Ali. Springer, Cham., 2019, vol.11606, pp.158-172. DOI: 10.1007/978-3-030-22999-3\_15.
2. Arun A. Architecting IoT for smart cities. In: Smart Cities in Application. Ed. by S. McClellan. Springer, Cham., 2020, pp.141-152. DOI: 10.1007/978-3-030-19396-6\_8.
3. Rybina G. V. *Intellektual'nye sistemy: ot A do Ya. Seriya monografii: v 3 kn. Kn. 2. Intellektual'nye dialogovye sistemy. Dinamicheskie intellektual'nye sistemy* [Intelligent systems: from A to Z. A series of monographs in 3 books. Book 2. Intelligent dialog systems. Dynamic intelligent systems]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2015, 164 p.
4. Rybina G. V. *Teoriya i tekhnologiya postroeniya integrirovannykh ekspertnykh sistem* [Theory and technology of building integrated expert systems]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2008, 432 p.
5. Tarasov V. B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow, URSS Publ., 2002, 352 p.
6. Filatov V. V., Anfimova A. Yu., Novitsky I. Yu., Golovanov V. I., Fadeev A. S. Features of management of a parking space in the metropolis. *Naukovedenie*, 2015, vol.7, no.5(30), pp.2-23 (in Russian). DOI: 10.15862/133EVEN515.
7. Styryn E., Kostyrko A. Implementing smart services in Moscow: The integrated mobile platform. In: Smarter as the new urban agenda: A comprehensive view of the 21st century city. N.Y., Heidelberg, Springer, 2016, pp.225-241. DOI: 10.1007/978-3-319-17620-8\_12.
8. Ripan T., Ganguly S. Energy management at municipal parking deck for charging of Plug-in hybrid electric vehicles. Proceedings of the IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2014, pp.1-5. DOI: 10.1109/SCEECS.2014.6804482.
9. Tariq Sh., Choi H., Park H., Lee J. W. Efficient parking control algorithms for self-driving cars. International Journal of Internet Technology and Secured Transactions (IJITST), 2019, vol.9, no.3, pp.332-352. DOI:10.1504/IJITST.2019.10023434.
10. Gorodetsky V. I., Karsaev O. V., Samoilov V. V., Serebryakov S. V. Applied multiagent systems of group control. *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij*=Scientific and Technical Information Processing, 2009, no.2, pp.3-24 (in Russian).
11. Rybina G. V., Parondzhanov S. S. Modeling of intelligent agent interactions for multiagent systems. *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij*=Scientific and Technical Information Processing, 2008, no.3, pp.22-29 (in Russian).
12. Rybina G. V., Parondzhanov S. S. The IMIA system and its usage for building multi-agent systems. *Programmnye produkty i sistemy*=Software & Systems, 2009, no.4, pp.43-48 (in Russian).
13. Thuesen G. J., Sullivan W. G. Engineering economy – a historical perspective. Georgia Institute of Technology / Virginia Polytechnic Institute and State University, 1984. Docslib.org. Available at: <https://docslib.org/doc/5003168/engineering-economy-a-historical-perspective> (accessed 09.08.2022).

14. Menn A., Petrov E. *Intellektual'nye sistemy upravleniya parkovochnym prostranstvom* [Intelligent parking space management systems]. *Transport strategy – XXI century*, 2017, no.36, pp.22-23.
15. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow, MPSI Publ., 2005, 584 p.
16. Russel S., Norvig P. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyyi podkhod* [Artificial Intelligence: A modern approach]. 2nd edition. Moscow, Vilyams Publ., 2007, 1408 p.
17. Russell S. Rationality and intelligence: A brief update. In: *Fundamental issues of Artificial intelligence (synthese library)*. Ed. by Vincent C. Müller. Berlin, Springer, 2014, pp.7-28. DOI: 10.1007/978-3-319-26485-1\_2.
18. Shaveta J., Amandeep K. QQML – From scenario to Technology. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2018, vol.7, no.3, pp.30-34.

### About the authors

*Galina V. Rybina*, ORCID 0000-0003-2564-2299, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Intelligent Cybernetic Systems, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, gvrybina@mephi.ru

*Vladimir Yu. Stepankov*, ORCID 0000-0003-0783-000X, General Manager, SMART-TECH Ltd, Moscow, Russia, vstepankov@gmail.com

Received 18.05.2022, reviewed 03.06.2022, accepted 20.06.2022

# Методика предобработки данных машинного обучения для решения задач компьютерного зрения

А. Е. Трубин<sup>1\*</sup>, А. А. Морозов<sup>2</sup>, А. Е. Зубанова<sup>2</sup>, В. А. Ожередов<sup>1,3</sup>, В. С. Корепанова<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Университет «Синергия», Москва, Россия

<sup>2</sup> Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Орел, Россия

<sup>3</sup> Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>4</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия

\* niburt@yandex.ru

**Аннотация.** В сфере машинного обучения не существует единой методологии предобработки данных, так как все этапы этого процесса являются уникальными, под конкретную задачу. Однако в каждом направлении используется определенный тип данных. В гипотезе исследования предполагается, что можно четко структурировать последовательности и фазы подготовки данных для задач распознавания текстов. В статье рассмотрены основные принципы предобработки данных и выделение последовательных этапов как конкретной методики для задачи распознавания символов азбук. В качестве исходных данных были выбраны изображения набора ETL. Предобработка включала в себя этапы работы с изображениями, на каждом из которых в исходные данные вносились изменения. Первым шагом являлось кадрирование, которое позволило избавиться от лишней информации на изображении. Далее был рассмотрен подход преобразования изображения к исходному соотношению сторон и определен метод преобразования из оттенков серого в черно-белый формат. На следующем этапе были искусственно расширены линии символов для лучшего распознавания печатных азбук. На последнем этапе предобработки данных была произведена аугментация, которая позволила лучше распознавать символы азбук независимо от их положения в пространстве. Как результат, была выстроена общая структура методики предобработки данных для задач распознавания текстов.

**Ключевые слова:** нейронные сети, сверточная нейронная сеть, предобработка данных, компьютерное зрение, машинное обучение

**Для цитирования:** Трубин А. Е., Морозов А. А., Зубанова А. Е., Ожередов В. А., Корепанова В. С. Методика предобработки данных машинного обучения для решения задач компьютерного зрения // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 47–56. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-47-56

# The method of preprocessing machine learning data for solving computer vision problems

A. Trubin<sup>1\*</sup>, A. Morozov<sup>2</sup>, A. Zubanova<sup>2</sup>, V. Ozheredov<sup>1,3</sup>, V. Korepanova<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Synergy University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

<sup>3</sup> Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup> LLC LUKOIL-Engineering, Moscow, Russia

\* niburt@yandex.ru

**Abstract.** In the field of machine learning, there is no single methodology for data preprocessing, since all stages of this process are unique for a specific task. However, a specific data type is used in each direction. The research hypothesis assumes that it is possible to clearly structure the sequences and phases of data preparation for text recognition tasks. The article discusses the basic principles of data preprocessing and the allocation of successive stages as a specific technique for the task of recognizing ABC characters. ETL set images were selected as the source data. Preprocessing included the stages of working with images, at each of which changes were made to the source data. The first step was cropping, which allowed to get rid of unnecessary information in the image. Next, the approach of converting the image to the original aspect ratio was considered and the method of converting from shades of gray to black and white format was determined. At the next stage, the character lines were artificially expanded for better recognition of printed alphabets. At the last stage of data preprocessing, augmentation was performed, which made it possible to better recognize ABC characters regardless of their position in space. As a result, the general structure of the data preprocessing methodology for text recognition tasks was built.

**Keywords:** neural networks, convolutional neural network, preprocessing, computer vision, machine learning

**For citation:** Trubin A., Morozov A., Zubanova A., Ozheredov V., Korepanova V. The method of preprocessing machine learning data for solving computer vision problems. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.47-56 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-47-56

## Введение

Распознавание образов – одна из самых распространенных задач в машинном обучении. Человек почти всегда может однозначно интерпретировать изображенное на рисунке. Для компьютера, в свою очередь, это изображение не имеет никакого смысла. С помощью алгоритмов машинного обучения человечество научило машины решать задачи различного рода, в том числе и распознавание образов. До недавнего времени мы действительно справлялись с этой задачей лучше компьютеров. Американская компания

Vicarious научила искусственный интеллект решать reCAPTCHA от Google (система, разработанная для защиты веб-сайтов от интернет-ботов и одновременной помощи в оцифровке текстов книг)<sup>1</sup>. Вместо анализа тысяч примеров готовых капч систему научили видеть и анализировать буквы. Vicarious AI протестировали эффективность сети на примере reCAPTCHA. Результат оказался даже лучше, чем у человека – точность 94% против 87%.

<sup>1</sup> URL: <https://www.vicarious.com/posts/vicarious-ai-passes-first-turing-test-captcha>

Распознавание текста и символов является одним из быстро развивающихся направлений в области компьютерного зрения, и данному направлению посвящено много научных работ [2–6, 8–12]. Однако в данном направлении существует еще много нерешенных вопросов. Так, в сфере машинного обучения не существует единой методологии предобработки данных, поскольку все этапы данного процесса являются уникальными, под конкретную задачу. При этом в каждом направлении используется определенный тип данных. В гипотезе исследования предполагается, что можно четко структурировать последовательности и фазы подготовки данных для задач распознавания текстов. Таким образом, целью работы является построение типовой методики предобработки данных для задачи распознавания символов азбук как пяти последовательных этапов:

- 1) кадрирование изображений;
- 2) изменение размерности;
- 3) преобразование в черно-белый формат;
- 4) расширение изображения;
- 5) аугментация данных. Таким образом, основной задачей исследования является детализация процесса предподготовки данных для каждого выделенного этапа.

Научная новизна работы заключается в обосновании универсальности и необходимости наличия всех вышеуказанных этапов при предварительной подготовке изображений для задач распознавания текстов.

За основу были взяты японские азбуки хирагана и катакана для последующей разработки системы их распознавания. Предобработка данных выступает первым этапом для разработки модели сверточной нейронной сети для распознавания символов японских азбук – языки восточной группы являются наиболее сложными, так как стиль их написания характеризуется большим количеством черт и схожестью символов, что значительно усложняет работу с данными. К данной группе принадле-

жит и японский язык, состоящий из двусложных азбук – хираганы и катаканы.

В японском языке существует много похожих символов, а азбуки и вовсе повторяют друг друга. На данный момент на рынке представлены приложения, несущественно отличающихся по функционалу друг от друга. Давайте ознакомимся с самыми успешными представителями данного направления.

1. Naver Papago – переводчик, разработанный в Южной Корее. Помимо японского, поддерживает еще 12 языков. В нем присутствует функция распознавания по фото, однако работает он не всегда быстро. Распознавание и перевод может занимать до десяти секунд. Для работы оптического распознавания требуется стабильное подключение к сети Интернет. Приложение распространяется на бесплатной основе.

2. Яркси – японско-русский компьютерный словарь. Является отечественной разработкой, поддерживаемой двумя энтузиастами – Владимиром Смоленским и Всеволодом Алексеевым. Функционал приложения выходит за рамки простого распознавания символов японских азбук. В приложении реализован поиск символов по их написанию в специальной графической оболочке с помощью мыши или графического планшета. Скорость распознавания – менее секунды, однако нужный символ не всегда находится с первого раза. Приложение распространяется на бесплатной основе.

3. iTranslate – приложение поддерживает больше 100 языков, включая японский. Распространяется на условно бесплатной основе. Функция оптического распознавания доступна по платной подписке за 5,99 долларов США в месяц. Работает как в онлайн-, так и в офлайн-режиме.

4. Сканер-переводчик – еще одна отечественная разработка. Несмотря на небольшой вес, приложение работает с 60 языками, включая японский, однако только в режиме онлайн. Для работы оптического распозна-

вания символов требуется загрузить фотографию в приложение.

5. Camera Translator – программа, в которой доступно свыше ста языков. Также доступно оптическое распознавание. Для этого необходимо сфотографировать символ и загрузить его в приложение.

Анализ каждого из представленных приложений представлен в таблице 1. Оценка производилась по следующим критериям: стоимость, возможность распознавания в режиме офлайн, распознавание в режиме реального времени по изображению с камеры, средняя скорость распознавания.

Изучив представленную таблицу, однозначно можно сказать, что у большинства приложений существует ряд недостатков. Исходя из них можно составить конкурентные требования для разрабатываемой системы, которые составят ее уникальность:

1. Приложение должно распространяться на бесплатной основе с открытым исходным кодом.

2. Приложение должно поддерживать распознавание японских азбук без доступа к сети Интернет.

3. Приложение должно распознавать символы японских азбук в режиме реального

времени, накладывая результат своей работы на изображение с камеры.

4. Скорость распознавания не должна быть ниже, чем у представленных аналогов.

Реализуя все перечисленные выше требования, приложение сможет превзойти существующие аналоги в области распознавания японских азбук, а первым этапом в его разработке станет предварительная обработка исходных данных.

Обработка изображений (Image Processing, IP) – это компьютерная технология, применяемая к изображениям, которая помогает обрабатывать, анализировать и извлекать из них полезную информацию. Это одна из быстро развивающихся технологий, и она широко развивалась на протяжении многих лет. Сегодня множество компаний и организаций из разных сфер используют обработку изображений для решения важных повседневных задач, таких как визуализация, извлечение информации из изображений, распознавание образов, классификация и сегментация.

Существует два метода обработки изображений – аналоговый и цифровой. Аналоговый метод (IP) применяется к печатным копиям, таким как отсканированные фотографии и распечатки, выходными

**Таблица 1.** Сравнение приложений для оптического распознавания японских азбук

**Table 1.** Comparison of applications for optical recognition of Japanese alphabets

Название / Критерий оценки <i>Name / Evaluation criteria</i>	Naver Papago	Яркси Yarksi	iTranslate	Сканер-переводчик Scanner-translator	Camera Translator
Стоимость (доллары США) <i>Cost (US dollars)</i>	Бесплатно <i>Free software</i>	Бесплатно <i>Free software</i>	5,99	Бесплатно <i>Free software</i>	Бесплатно <i>Free software</i>
Режим офлайн <i>Offline mode</i>	Нет <i>No</i>	Да <i>Yes</i>	Да <i>Yes</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>
Распознавание в режиме реального времени <i>Real-time recognition</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>
Средняя скорость распознавания (с) <i>Average recognition speed (s)</i>	6	<1	5	10	5

данными здесь обычно являются изображения. Digital IP используется для управления цифровыми изображениями с помощью компьютеров; выходные данные здесь обычно представляют собой информацию, связанную с этим изображением.

В качестве данных для обучения нейронной сети была использована база данных символов ETL. Она представляет собой набор изображений – около 1,2 миллиона рукописных символов, латинских и японских алфавитов, собранных в 9 наборов данных (от ETL-1 до ETL-9). Эта база данных собиралась Национальным институтом передовых промышленных наук и технологий (AIST) в сотрудничестве с Японской ассоциацией производителей электроники и информационных технологий с 1973 по 1984 год.

База данных достаточно обширна. В данной работе был использован набор ETL-8. Он содержит 142 символа хираганы и катаканы, в написании которых принимало участие около 160 человек, и состоит из 11 360 изображений. Данный набор доступен всем желающим для некоммерческого использования и рассылается по запросу на официальном сайте<sup>1</sup>.

Файл поставляется с расширением prz – заархивированные данные NumPy. Набор данных представлен в оттенках серого, каждое изображение имеет размерность 127×128 пикселей. Соответственно, весь набор представляет собой матрицу размерностью 127×128×11360, где каждому символу соответ-

ствует 80 изображений. На рисунке 1 можно ознакомиться с частью исходных данных.

Предварительная обработка изображений – это шаги, предпринятые для форматирования изображений, прежде чем они будут использоваться для обучения модели. Эти шаги необходимы для приведения исходных данных к виду, пригодному для подачи на вход нейронной сети. Например, полностью связанные слои в сверточных нейронных сетях требуют, чтобы все изображения представляли собой массивы одинакового размера, при этом их приведение требует преодоления ряда проблем, таких как неопределенный размер, наличие ошибок в тексте, свободный стиль рукописного написания и т. п. [7].

### Кадрирование изображений

Хотелось бы отметить, что набор является качественным, так как был сформирован конкретно под задачи обучения нейронных сетей. Однако даже в нем есть недочеты, которые необходимо исправить. Одним из таких недочетов является наличие черной области вокруг символов, которая не несет полезной информации. Лишняя информация на изображении будет ухудшать итоговый результат модели, поэтому избавимся от нее, осуществив кадрирование.

Данная задача является трудоемкой, так как придется обработать 11 360 изображений, соответственно, делать это вручную нецелесообразно. Автоматизируем данный процесс,

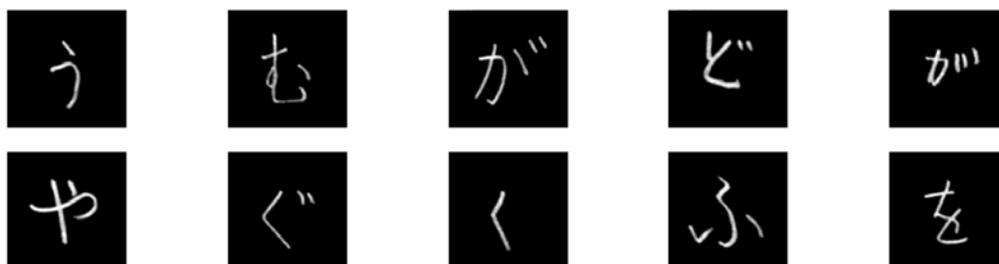


Рис. 1. Пример исходных данных

Fig. 1. Sample input

<sup>1</sup> URL: <http://etlcdb.db.aist.go.jp>

разработав универсальный метод для обрезки изображений.

Каждый элемент исходных данных представлен в оттенках серого. Это значение, указывающее яркость каждого пикселя изображения. Обычно диапазон значений составляет от 0 до 255, где 255 – белый, а 0 – черный. В изображениях, представленных в оттенках серого, нет цвета. Это значит, что все компоненты цвета RGB равны. Серая шкала изображения предназначена для того, чтобы каждый пиксель в матрице удовлетворял соотношению  $R = G = B$ , и это значение называется значением серого.

Перед тем как мы найдем границы символов, следует преобразовать изображения из оттенков серого в черно-белый формат.

Далее используем функцию *findContours* из той же библиотеки. Она возвращает контуры, формируя маску на изображении. Если представить изображение в виде матрицы, то его размерность запишем как  $h \times w$ . Тогда маску можно представить как  $hm \times wm$ . Изображение формируется по следующему принципу:

$$img = \left\{ \begin{array}{l} hm \text{ if } h > hm \\ wm \text{ if } w > wm \end{array} \right\}. \quad (1)$$

С результатом работы указанных выше преобразований можно ознакомиться на рисунке 2.



Рис. 2. Исходное изображение

Fig. 2. Original image

## Изменение размерности

На предыдущем рисунке можно заметить, что после кадрирования в изображении изме-

нилось соотношение сторон, в данном случае  $72 \times 48$ . Очевидно, что для каждого изображения, прошедшего кадрирование, это соотношение будет разным. Поэтому на следующем этапе целесообразно приводить их к одинаковой размерности –  $40 \times 40$  пикселей. В качестве метода изменения размерности используем повторную выборку с использованием отношения площади пикселя. На рисунке 3 можно ознакомиться с результатом изменения размерности изображения.



Рис. 3. Пример изменения размерности изображения

Fig. 3. Example of changing the dimension of an image

## Преобразование в черно-белый формат

На данном этапе обработки изображений необходимо перевести результат предыдущих шагов в черно-белый формат. Для этого следует определиться с пороговым значением, по которому и будет происходить преобразование. Если значение пикселя меньше порогового значения, оно устанавливается равным 0, в противном случае меняется на максимальное значение. Для преобразования воспользуемся функцией *threshold* из библиотеки OpenCV. В качестве параметра порогового значения укажем значение 102, установленное опытным путем. Тип преобразования укажем `THRESH_BINARY`, с помощью него все значения пикселей, которые меньше заданного порога, будут переводиться в белый, выше – в черный. Данный тип преобразования можно записать следующим образом:

$$dst(x, y) = \left\{ \begin{array}{l} \max val \text{ if } scr(x, y) > tresh \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right\}. (2)$$

Результат преобразования изображения в черно-белый формат представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Пример преобразования изображения в черно-белый формат

Fig. 4. Black and white conversion example

### Расширение изображения

Задача распознавания японских азбук распространяется как на рукописные, так и на печатные символы. В рукописном виде они значительно тоньше печатных. Поэтому необходимо расширить толщину линий для того, чтобы нейронная сеть справлялась с печатными символами так же, как и с рукописными.

Для изменения толщины линий символа необходимо провести свертку изображения  $A$  с некоторым ядром  $B$ , они могут иметь любую форму и размер. Ядро  $B$  имеет определенную точку привязки, которая обычно является центром ядра. По мере сканирования ядра  $B$  на изображении вычисляется максимальное значение пикселя, перекрываемого  $B$ . Далее пиксель заменяется в опорной точке максимальным значением. Получается, что эта операция «максимизации» приводит к росту ярких областей изображения. Операцию расширения можно записать как

$$dst(x, y) = \max_{(x', y') : element(x', y') \neq 0} src(x + x', y + y'). (3)$$

Данное преобразование произведем в 2 итерации, в качестве ядра выступит массив [1]. С результатом расширения линий символов можно ознакомиться на рисунке 5.



Рис. 5. Пример изображения с расширенными линиями

Fig. 5. Extended lines image example

Полученные таким способом изображения добавим к данным, полученным на предыдущем шаге. В итоге размер выборки теперь составит  $22720 \times 40 \times 40 \times 1$ .

### Аугментация данных

Аугментация – это метод, который можно использовать для искусственного увеличения размера обучающей выборки путем создания модифицированных данных из существующих. Этот прием обширно используется во всех областях машинного обучения, так как увеличить можно данные любого вида. К основным методам аугментации изображений относятся:

- 1) геометрические преобразования – обрезка, повороты, смещения изображения;
- 2) преобразование цветового пространства – изменение цветовых каналов RGB, усиление любого цвета;
- 3) фильтры ядра – изменение резкости или размытие изображения;
- 4) случайное стирание – удаление части исходного изображения.

С результатами геометрических преобразований данных можно ознакомиться на рисунке 6.

После добавления к данным преобразованных изображений размерность всей выборки будет составлять  $227200 \times 40 \times 40 \times 1$ .



Рис. 6. Примеры аугментации данных с применением геометрического преобразования  
 Fig. 6. Examples of data augmentation using geometric transformation

## Заключение

В данной работе были рассмотрены и структурированы основные этапы обработки изображений для формирования типовой методики подготовки данных машинного обучения для решения задач компьютерного зрения.

Предобработка включила в себя пять основных этапов работы с изображениями, на каждом из которых в исходные данные вносились изменения (при этом сами технологии и способы изменения на практике могут отличаться в зависимости от специфики решаемой задачи). Кадрирование позво-

лило избавиться от шумов на изображении. Преобразование изображений к исходному соотношению сторон и преобразования цветовой гаммы привели к снижению объема данных. Расширение линии символов позволило облегчить нейронной сети распознавание как печатных, так и рукописных символов. Аугментация позволила лучше распознавать символы азбук, независимо от их положения в пространстве.

Таким образом, на основании предлагаемой методики были преобразованы данные для последующего машинного обучения распознавания символов азбук.

## Список литературы

1. Бобылева Е. А., Родионов А. В. Исследование существующих подходов к распознаванию японских иероглифических символов // Инновационная наука. 2017. № 4-3. С. 28–32.
2. Бредихин А. И. Алгоритмы обучения сверточных нейронных сетей // Вестник Югорского государственного университета. 2019. № 1 (52). С. 41–54. DOI: 10.17816/byusu20190141-54.
3. Коваленко А. И. Большие данные как ключевые мощности в антимонопольном регулировании цифровых рынков // Современная конкуренция. 2021. Т. 15. № 2 (92). С. 19–28. DOI: 10.37791/2687-0657-2021-15-2-19-28.
4. Andreev S. Yu., Glinkin N. A., Nikoghosyan N. V. Analysis of machine learning algorithms used in software-defined networks // Information Systems and Technologies. 2022. No. 3 (131). P. 84–94.
5. Bottou L., Curtis F. E., Nocedal J. Optimization methods for large-scale machine learning // SIAM Review. 2018. Vol. 60. No. 2. P. 223–311. DOI: 10.1137/16M1080173.
6. Bunke H., Wang P. S. P. Handbook of character recognition and document image analysis. – USA: World Scientific Publishing Company, 1997. – 883 p.
7. Dli M. I., Bulygina O. V., Sokolov A. M. Rubrication of text information based on the voting of intellectual classifiers // Journal of Applied Informatics. 2020. Vol. 15. No. 5 (89). P. 29–36. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-5-29-36.
8. Heaton J. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville: Deep learning // Genetic Programming and Evolvable Machines. 2017. Vol. 19. No. 1-2. P. 305–307. DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
9. Hinton G., Srivastava N., Swersky K. Neural networks for machine learning. Lecture 6a: Overview of mini-batch gradient descent. URL: [https://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture\\_slides\\_lec6.pdf](https://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides_lec6.pdf) (дата обращения: 15.08.2022).

10. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // *The Journal of Physiology*. 1962. No. 160 (1). P. 106–154. DOI: 10.1113/jphysiol.1962.sp006837.
11. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift // *Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning*. 2015. Vol. 37. P. 448–456.
12. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012. No. 25 (2). P. 84–90. DOI: 10.1145/3065386.

### Сведения об авторах

Трубин Александр Евгеньевич, ORCID 0000-0002-7189-5679, канд. экон. наук, доцент, директор департамента цифровой экономики, Университет «Синергия», Москва, Россия, niburt@yandex.ru

Морозов Артем Андреевич, ORCID 0000-0002-9509-8068, студент 4-го курса, кафедра информационных систем и цифровых технологий, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Орел, Россия, tema.toro2016@gmail.com

Зубанова Анастасия Евгеньевна, ORCID 0000-0002-9631-2513, магистрант 1-го курса по направлению подготовки 38.04.01 «Экономика», Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Орел, Россия, an.zubanova2606@yandex.ru

Ожередов Вадим Андреевич, ORCID 0000-0001-6641-444X, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра информационного менеджмента и информационно-коммуникационных технологий им. профессора В. В. Дика, Университет «Синергия»; научный сотрудник, Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.ru

Корепанова Вероника Сергеевна, ORCID 0000-0002-0047-0796, канд. техн. наук, доцент, департамент цифровой экономики, Университет «Синергия»; ведущий инженер ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия, vskorepanova5@gmail.com

Статья поступила 15.07.2022, рассмотрена 08.08.2022, принята 18.08.2022

### References

1. Bobyleva E. A., Rodionov A. V. *Issledovanie sushchestvuyushchih podhodov k raspoznavaniyu yaponskih ieroglificheskikh simvolov* [Research of existing approaches to recognition of Japanese hieroglyphic characters]. *Innovacionnaya nauka*, 2017, no.4-3, pp.28-32.
2. Bredihin A. I. Training algorithms for convolutional neural networks. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*=Yugra State University Bulletin, 2019, no.1(52), pp.41-54 (in Russian). DOI: 10.17816/byusu20190141-54.
3. Kovalenko A. Big Data as a essential facilities in the antitrust regulation of digital markets. *Sovremennaya konkurentsia*=Journal of Modern Competition, 2021, vol.15, no.2(92), pp.19-28 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0657-2021-15-2-19-28
4. Andreev S. Yu., Glinkin N. A., Nikoghosyan N. V. Analysis of machine learning algorithms used in software-defined networks. *Information Systems and Technologies*, 2022, no.3(131), pp.84-94.
5. Bottou L., Curtis F. E., Nocedal J. Optimization methods for large-scale machine learning. *SIAM Review*, 2018, vol.60, no.2, pp.223-311. DOI: 10.1137/16M1080173.
6. Bunke H., Wang P. S. pp. *Handbook of character recognition and document image analysis*. USA, World Scientific Publishing Company, 1997, 883 p.
7. Dli M., Bulygina O., Sokolov A. Rubrication of text information based on the voting of intellectual classifiers. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2020, vol.15, no.5(89), pp.29-36. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-5-29-36.
8. Heaton J. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville: Deep learning. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2017, vol.19, no.1-2, pp.305-307. DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
9. Hinton G., Srivastava N., Swersky K. Neural networks for machine learning. Lecture 6a: Overview of mini-batch gradient descent. Available at: [https://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture\\_slides Lec6.pdf](https://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides Lec6.pdf) (accessed 15.08.2022).
10. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of Physiology*, 1962, no.160(1), pp.106-154. DOI: 10.1113/jphysiol.1962.sp006837.
11. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. *Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning*, 2015, vol.37, pp.448-456.
12. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012, no.25(2), pp.84-90. DOI: 10.1145/3065386.

**About the authors**

*Alexander E. Trubin*, ORCID 0000-0002-7189-5679, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Director of the Digital Economy Department, Synergy University, Moscow, Russia, niburt@yandex.ru

*Artem A. Morozov*, ORCID 0000-0002-9509-8068, 4th year Student, Information Systems and Digital Technology Department, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, tema.moro2016@gmail.com

*Anastasiya E. Zubanova*, ORCID 0000-0002-9631-2513, 1st year Master's Student in the direction of preparation 38.04.01 "Economics", Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, an.zubanova2606@yandex.ru

*Vadim A. Ozheredov*, ORCID 0000-0001-6641-444X, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Information Management and Information and Communication Technologies Department named after Professor V. V. Dik, Synergy University; Researcher, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ozheredov2016@gmail.ru

*Veronika S. Korepanova*, ORCID 0000-0002-0047-0796, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Digital Economy Department, Synergy University; Leading Engineer, LLC LUKOIL-Engineering, Moscow, Russia, vskorepanova5@gmail.com

Received 15.07.2022, reviewed 08.08.2022, accepted 18.08.2022

DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-57-74

# Применение технологий искусственного интеллекта в научно-технологическом прогнозировании

С. С. Голубев<sup>1,2\*</sup>, А. Л. Афанасьев<sup>2</sup>, А. В. Курицын<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГУП «ВНИИ "Центр"», Москва, Россия

\* sergei.golubev56@mail.ru

**Аннотация.** В настоящее время искусственный интеллект широко применяется при формировании прогнозов. Вместе с тем вопрос его применения в научно-технологическом прогнозировании проработан недостаточно. Цель исследования заключалась в поиске эффективных подходов к применению технологий искусственного интеллекта при формировании научно-технологических прогнозов. Задачей исследования явилось определение технологий искусственного интеллекта, которые могут использоваться на различных этапах жизненного цикла научно-технологического прогнозирования, и конкретизация отдельных способов их применения. Это подтверждает актуальность проведенного исследования. Основным методом исследования является анализ отечественных и зарубежных публикаций и передовых практик использования технологий искусственного интеллекта при научно-технологическом прогнозировании, а также результатов выполненных авторами научно-исследовательских работ в области научно-технологического прогнозирования и адаптации их для совершенствования формирования прогнозов в условиях цифровой трансформации экономики и предприятий. В статье рассмотрена структура выполняемых технологиями искусственных функций и определены приоритетные направления использования искусственного интеллекта на различных этапах научно-технологического прогнозирования. Показаны целесообразность и особенности применения семантического анализа и когнитивных технологий при прогнозировании уровня готовности техники и технологий по сравнению с мировым при различных сценарных условиях, позволяющих выбрать сценарий развития, обеспечивающий наибольшую эффективность принятого решения. Рассмотрены вопросы информационно-аналитического обеспечения использования искусственного интеллекта при научно-технологическом прогнозировании на базе информационных технологий поддержки принятия решений. Новизна представленных результатов заключается в том, что авторами впервые с позиции системного и комплексного подходов описаны возможности применения наиболее эффективных технологий искусственного интеллекта на различных этапах цикла формирования научно-технологических прогнозов.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, научно-технологическое прогнозирование, этапы прогнозирования, когнитивные технологии, эффективность

**Для цитирования:** Голубев С. С., Афанасьев А. Л., Курицын А. В. Применение технологий искусственного интеллекта в научно-технологическом прогнозировании // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 57–74. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-57-74

# The use of artificial intelligence technologies for scientific and technological forecasting

S. Golubev<sup>1,2\*</sup>, A. Afanasiev<sup>2</sup>, A. Kuritsyn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Federal State Unitary Enterprise "AH-Russia and research institute "Center", Moscow, Russia

\* sergei.golubev56@mail.ru

**Abstract.** Currently, artificial intelligence is widely used in the formation of social, economic and environmental forecasts. When creating artificial intelligence, machine learning technologies, deep learning technology and searching for patterns in information arrays (Big Data), artificial language processing and generation technologies, etc. are widely used. At the same time, the issue of using artificial intelligence in scientific and technological forecasting has not been worked out enough. The purpose of the study was to find effective approaches to the use of artificial intelligence technologies in the formation of scientific and technological forecasts. The objective of the study was to identify artificial intelligence technologies that can be used at various stages of the life cycle of scientific and technological forecasting and to specify individual ways of using them to solve problems of predicting the level of development of science, engineering and technology compared to the world. This confirms the relevance of the study. The main research method is the analysis of domestic and foreign publications and best practices for using artificial intelligence technologies in scientific and technological forecasting, as well as the results of research work performed by the authors in the field of scientific and technological forecasting and adapting them to improve the formation of forecasts in the context of digital transformation of the economy and enterprises. The authors considered the structure of artificial functions performed by technologies and identified priority areas for the use of artificial intelligence at various stages of scientific and technological forecasting. The expediency and features of the use of semantic analysis and cognitive technologies in predicting the level of readiness of equipment and technologies in comparison with the world under various scenario conditions are shown, which provides the greatest efficiency of the adopted solution. The issues of information and analytical support for the use of artificial intelligence in scientific and technological forecasting based on information technologies for decision support are considered. The novelty of the presented results lies in the fact that, for the first time, the authors describe the possibilities of using the most effective artificial intelligence technologies at various stages of the life cycle for the formation of scientific and technological forecasts from the standpoint of a systematic and integrated approach.

**Keywords:** artificial intelligence, scientific and technological forecasting, forecasting stages, cognitive technologies, efficiency

**For citation:** Golubev S., Afanasiev A., Kuritsyn A. The use of artificial intelligence technologies for scientific and technological forecasting. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.57-74 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-57-74

## Введение

**П**ервоочередным национальным интересом и стратегическим национальным приоритетом на долгосрочную

перспективу является научно-технологическое развитие страны, обеспечивающее неизблемость конституционного строя, суверенитета, независимости, государственной

и территориальной целостности Российской Федерации. Факт обладания государством уникальными технологиями и современными видами техники в настоящее время является надежной гарантией мира на планете [1].

Одним из наиболее эффективных инструментов решения этих задач является разработка долгосрочных прогнозов научно-технологического развития с использованием методов форсайта, включая комплекс количественных моделей, методов качественного анализа и экспертных оценок. К настоящему моменту в ведущих в технологическом отношении иностранных государствах разработаны тысячи таких прогнозов, результаты которых используются в качестве основы для принятия стратегических решений на национальном, отраслевом и корпоративном уровнях [2].

Необходимость правильного выбора приоритетных направлений научно-технологического развития страны обусловлена тем, что современное состояние экономики и общества характеризуется все возрастающей сложностью, высоким уровнем неопределенности и скорости происходящих процессов, ключевую роль в которых играют наука и технологии. В этих условиях цена ошибок при принятии стратегических решений значительно возрастает, что приводит к необходимости формирования адекватных представлений о глобальных вызовах, связанных с ними перспективах развития отдельных секторов экономики, факторах, определяющих это развитие, их количественных и качественных характеристиках.

В связи с этим становится актуальной задача совершенствования системы научно-технологического прогнозирования, повышения точности и качества формируемых прогнозов. Перспективным направлением совершенствования методов научно-технологического прогнозирования авторы видят использование технологий искусственного интеллекта (ИИ) на различных его этапах формирования.

Под технологиями искусственного интеллекта понимают технологии, основанные на использовании искусственного интеллекта, включая компьютерное зрение, обработку естественного языка, распознавание и синтез речи, интеллектуальную поддержку принятия решений и другие перспективные методы искусственного интеллекта [3]. В ближайшее время более 80% перспективных технологий будут разработаны на основе ИИ, а методы глубокого обучения придут на смену традиционному машинному обучению [4].

ИИ объединяет различные методы и подходы к решению проблем, которые не связаны или слабо связаны между собой. В ходе создания новых технологий ИИ применяются научно-технологические достижения, формирующие шестой технологический уклад: генную инженерию, биотехнологии, нанотехнологии, робототехнику, цифровые технологии и телекоммуникационные сети.

Цель исследования авторов заключалась в определении наиболее целесообразных технологий искусственного интеллекта для совершенствования процесса формирования научно-технологических прогнозов. Задачей исследования стало выявление технологий искусственного интеллекта, которые могут применяться для совершенствования процессов формирования научно-технологического прогноза для каждого из этапов формирования научно-технологического прогноза, а также конкретизация применения методов интеллектуального поиска и когнитивных технологий для выбора оптимальных сценариев развития науки, техники и технологий по сравнению с мировым.

## **Специфика постановки практической задачи**

Наиболее распространенной технологией ИИ, которая используется в прогнозировании, является технология искусственных нейронных сетей, построенных на основе принципов работы человеческого мозга [5].

Искусственные нейронные сети в сочетании с методом Хольта позволяют решать задачи прогнозирования финансовой деятельности, например прогнозы курсов валют, котировок акций, цен на металл и нефть и т. д. [6]. При этом метод Хольта применяют для временных рядов, которые имеют тенденцию к росту или падению [7]. В последние несколько лет технологии ИИ стали наиболее мощными и перспективными в прогнозировании, они обеспечивают высокую точность, превосходное обобщение, высокую отказоустойчивость и простоту работы с данными высокой размерности при формировании прогнозов [8].

Методология формирования научно-технологических прогнозов отличается от методологий формирования экономических прогнозов тем, что для формирования научно-технологических прогнозов используются методы анализа научно-технологической и патентной информации и экспертные методы. Применение технологий искусственного интеллекта для решения задач научно-технологического прогнозирования требует выбора подходящих технологий искусственного интеллекта и уточнения особенностей их применения для рассматриваемой предметной области.

Теоретическая основа, касающаяся возможностей, предлагаемых современными приложениями, инструментами ИИ, особенно искусственными нейронными сетями в области прогнозирования материаловедения, представлена в работе авторов из Силезского технологического университета, в том числе по моделированию различных свойств инженерных материалов [9]. Отдельно обсуждается новаторский проект по внедрению искусственных нейронных сетей для прогнозирования тенденций развития технологии обработки поверхностей материалов.

Из российских исследований представляет интерес применение когнитивных систем в интересах мониторинга и прогнозирования научно-технологического развития

государства [10]. Авторы показывают возможности использования алгоритмов комплексной оценки научно-технологических проектов на основе когнитивных технологий (эволюционные алгоритмы, нечеткие нейронные сети), а также дают оценку возможностей использования нейронечетких алгоритмов моделирования смены технологических укладов и когнитивной оценки приоритетных направлений научно-технологического развития государства.

### **Выбор методов интеллектуального анализа данных для научно-технологического прогнозирования**

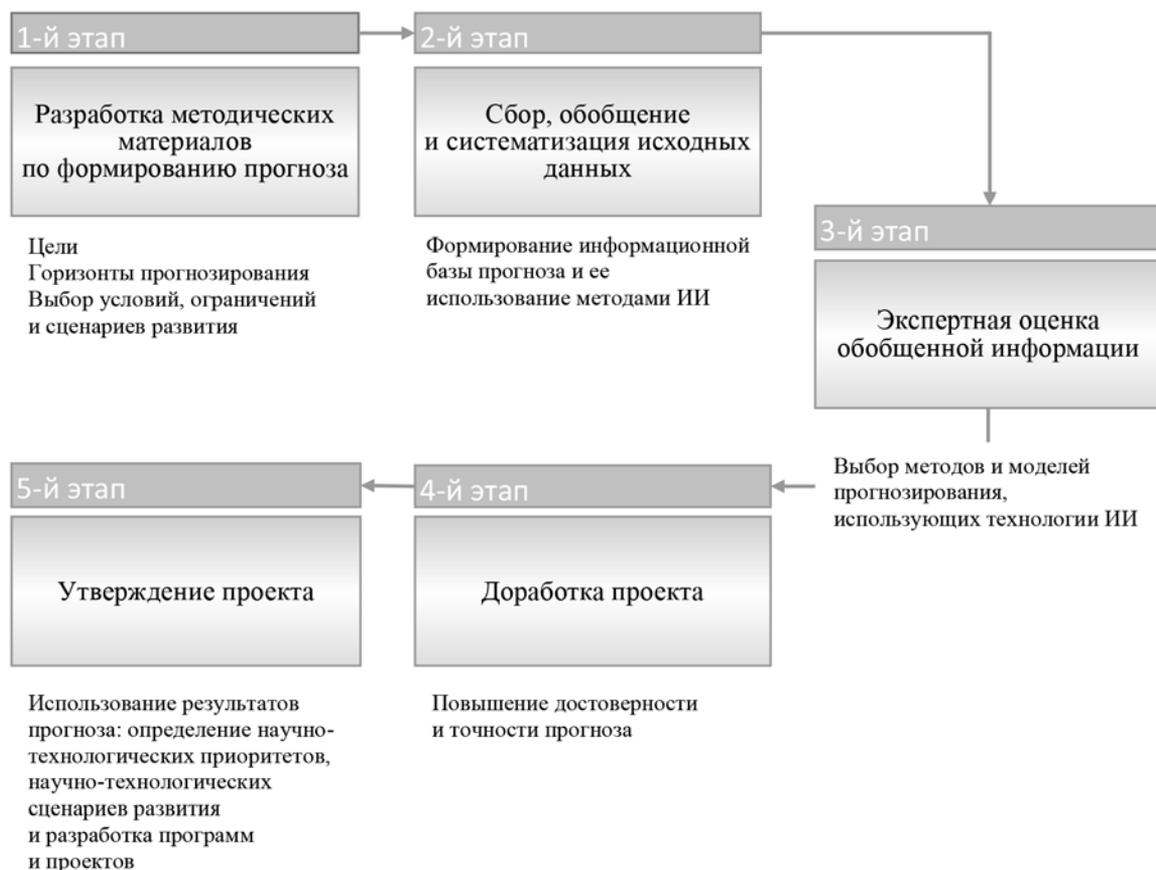
Основными задачами прогноза являются:

- а) сравнительная оценка уровня науки, техники и технологий в Российской Федерации и за рубежом;
- б) представление наиболее значимых результатов, которые могут быть использованы в интересах обеспечения обороны в очередной программный период;
- в) прогнозные оценки результатов развития науки и техники, которые могут быть достигнуты и использованы в интересах обороны страны и безопасности государства.

Процесс формирования научно-технологических прогнозов включает в себя этапы, представленные на рисунке 1.

Возможности применения технологий ИИ применительно к этапам научно-технологического прогнозирования представлены на рисунке 2.

При формировании информационной базы научно-технологических прогнозов, выявлении научно-технологических трендов применяется семантический анализ больших данных. Он осуществляется на основе анализа больших данных (более 400 млн полнотекстовых документов) в системе интеллектуального анализа больших данных iFORA и TextAppliance [11], разработанной в Институте статистических исследований



**Рис. 1.** Основные этапы формирования научно-технологических прогнозов  
**Fig. 1.** The main stages of the formation of scientific and technological forecasts

и экономики знаний НИУ ВШЭ. Она позволяет выявлять научно-технологические тренды, строить патентные ландшафты по различным научно-технологическим направлениям, определять будущие компетенции для реализации новых технологий.

iFORA основана на технологиях текстмайнинга и машинного обучения, позволяет быстро проводить операции по извлечению знаний и интеллектуальной обработке информации в интересах поддержки принятия стратегических решений в сфере научно-технологического развития.

Данная система обеспечивает реализацию следующих функций:

- выявление и анализ трендов развития науки и технологий, в том числе структуры,

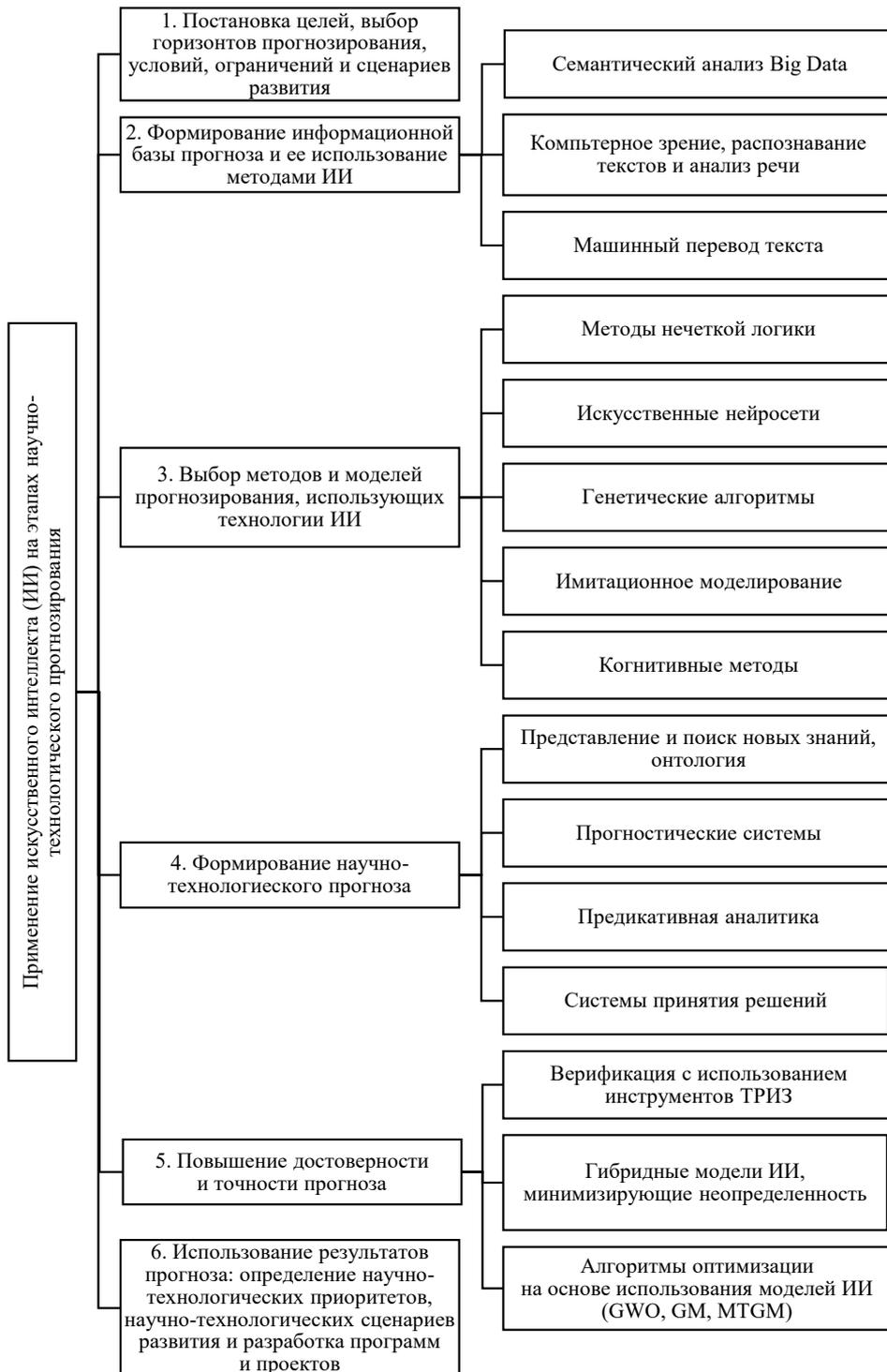
значимости и динамики направлений научно-технологического развития, а также жизненного цикла технологий;

- количественные и качественные оценки рынков, идентификация продуктовых технологических портфелей и выявление возникающих рынков;

- формирование линеек событий будущего; оценка драйверов, барьеров, эффектов;

- независимая оценка качества технологий, продуктов, услуг; репутационный анализ; внешняя экспертиза НИОКР; оценка мер политики и программ;

- управление информацией в части систематизации документов, извлечения знаний, картирования сетей кооперации, выявления центров компетенций и ключевых экспертов,



**Рис. 2.** Структура использования технологий ИИ на этапах научно-технологического прогнозирования

**Fig. 2.** The structure of the use of AI technologies at the stages of scientific and technological forecasting



Среди наиболее значимых направлений распределенные вычисления, аппаратное оборудование, компьютерное моделирование биохимических процессов, физические вычислительные модели.

Тренд-карты позволяют выделить четыре основные категории (квадранты): стабильные направления, растущие направления, «слабые сигналы» и возникающие тренды (рис. 4).

К «слабым сигналам» относятся технологии, которые только набирают популярность, а также другие тематики, которые могут получить активное развитие в ближайшем будущем.

Среди наиболее значимых направлений следует отметить машинное и глубокое обучение, технологии обработки естественного языка, распознавание и синтез речи, распознавание лиц, компьютерное зрение, технологии общего искусственного интеллекта, нейрокомпьютерные интерфейсы, рекомендательные системы.

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой вычислительные системы, которые основаны на принципах биологических нейронных сетей. С помощью ИНС возможно осуществлять классифика-

цию изображений, распознавание рукописных цифр, представление слов в векторном пространстве, прогнозирование временных рядов, что может ускорить формирование научно-технологических прогнозов и повысить их качество [13]. Такие сети могут быть применены для классификации сложных объектов в многомерном слабо формализуемом пространстве, необходимой для прогнозирования научно-технологического развития [14].

Когнитивные технологии целесообразно применять при мониторинге научно-технических достижений, а также при выявлении новых прорывных технологий и современных технических решений [15]. Широко применяется метод извлечения экспертных знаний о динамических свойствах ситуаций и их фиксация в виде так называемой когнитивной карты [16] (рис. 5).

На когнитивной карте отражены факторы, влияющие на уровень развития технологий по сравнению с мировым, а также дана экспертная оценка степени влияния этих факторов. Критерии оценки степени взаимного влияния факторов представлены в таблице 1.

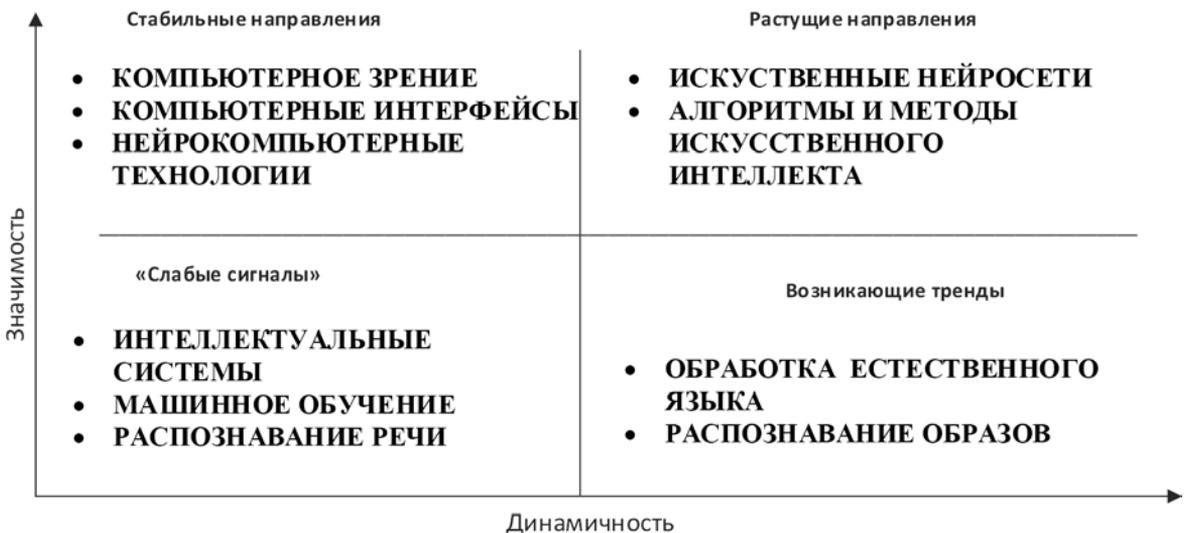


Рис. 4. Тренд-карта укрупненного фактора «Искусственный интеллект»

Fig. 4. Trend map of the enlarged factor "Artificial Intelligence"

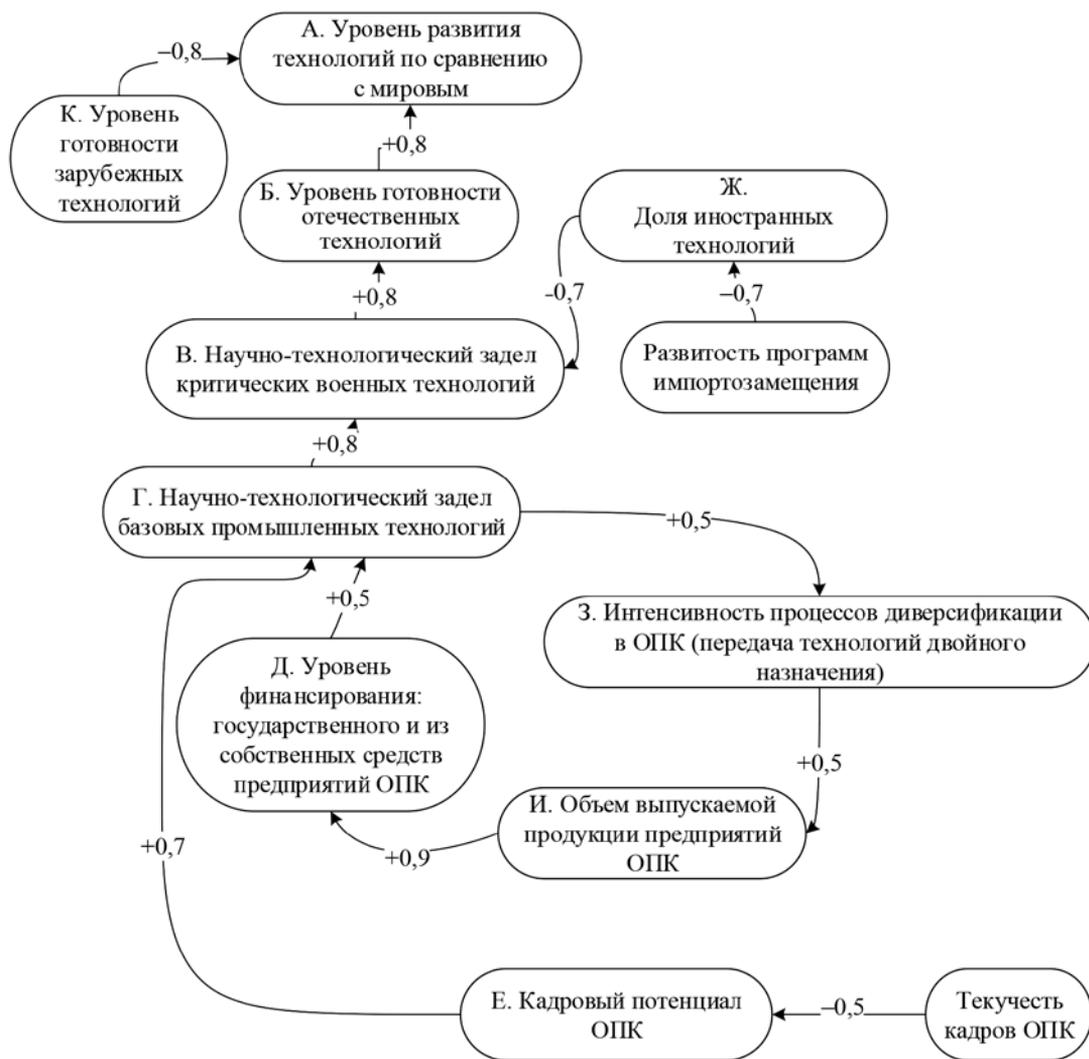


Рис. 5. Когнитивная карта уровня развития технологий по сравнению с мировым

Fig. 5. The structure of the use of AI technologies at the stages of scientific and technological forecasting

Таблица 1. Критерии оценки степени взаимного влияния факторов

Table 1. Criteria for assessing the degree of mutual influence of factors

Интенсивность влияния <i>Intensity of influence</i>	Критерии оценки степени взаимного влияния факторов <i>Criteria for assessing the degree of mutual influence of factors</i>
0–0,15	Очень слабо / <i>Very weak</i>
0,15–0,25	Слабо / <i>Weak</i>
0,25–0,5	Среднее / <i>The average</i>
0,5–0,75	Сильно / <i>Strong</i>
0,75–1	Очень сильное / <i>Very strong</i>

В таблице 2 представлена матрица взаимовлияния факторов модели уровня развития технологий по сравнению с мировым уровнем.

**Таблица 2.** Матрица взаимовлияния факторов модели уровня развития технологий по сравнению с мировым уровнем

**Table 2.** The matrix of mutual influence of factors of the model of the level of technology development in comparison with the world level

Матрица влияния факторов <i>Factor influence matrix</i>	(А)	(Б)	(В)	(Г)	(Д)	(Е)	(Ж)	(З)	(И)	(К)
Уровень развития технологий по сравнению с мировым <i>The level of technology development compared to the world</i>	(А) 0	0,8	0	0	0	0	0	0	0	-0,8
Уровень готовности отечественных технологий <i>The level of readiness of domestic technologies</i>	(Б) 0	0	0,8	0	0	0	-0,7	0	0	0
Научно-технологический задел критических военных технологий <i>Scientific and technological reserve of critical military technologies</i>	(В) 0	0	0	0,8	0	0	0	0	0	0
Научно-технологический задел базовых промышленных технологий <i>Scientific and technological reserve of basic industrial technologies</i>	(Г) 0	0	0	0	0,8	0,7	0	0	0	0
Уровень финансирования <i>Funding level</i>	(Д) 0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0
Кадровый потенциал <i>Personnel potential</i>	(Е) 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Доля иностранных технологий <i>Share of foreign technologies</i>	(Ж) 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Интенсивность процессов диверсификации <i>Intensity of diversification processes</i>	(З) 0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0
Объем выпускаемой продукции <i>Output volume</i>	(И) 0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0
Уровень готовности зарубежных технологий <i>The level of readiness of foreign technologies</i>	(К) 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Представленная матрица отражает влияние факторов на уровень развития технологий по сравнению с мировым. Так, на уровень развития технологий положительно воздействует уровень готовности отечественных

технологий (связь Б–А с интенсивностью +0,8), уровень готовности зарубежных технологий воздействует отрицательно (связь Л–А с интенсивностью -0,8). Таким образом, каждая связь уровня развития техноло-

гий, по сравнению с мировым, отражается в матрице взаимовлияния факторов модели.

Уровень готовности технологий оценивается по шкале уровней готовности технологий (TRL), где каждый уровень готовности технологии сопровождается подробным описанием [17]. На рисунке 6 представлено изменение уровня готовности технологий по периодам прогнозирования (шагом прогнозирования может быть месяц, квартал, год) для конкретного сценария, характеризующегося степенью влияния факторов на уровень готовности технологий.

Исследование влияния отрицательных факторов позволяет проводить проактивное моделирование, предсказывая и предупреждая негативные процессы в темпах развития уровня отечественных технологий по сравнению с мировым уровнем. Так, расчеты показывают, что при увеличении доли использования импортных технологий на 10% уровень развития технологий, по сравнению с мировым, снизится на 6%, а уровень готовности отечественных технологий – на 7%.

Исследование было проведено по пяти сценариям, представленным в таблице 3.

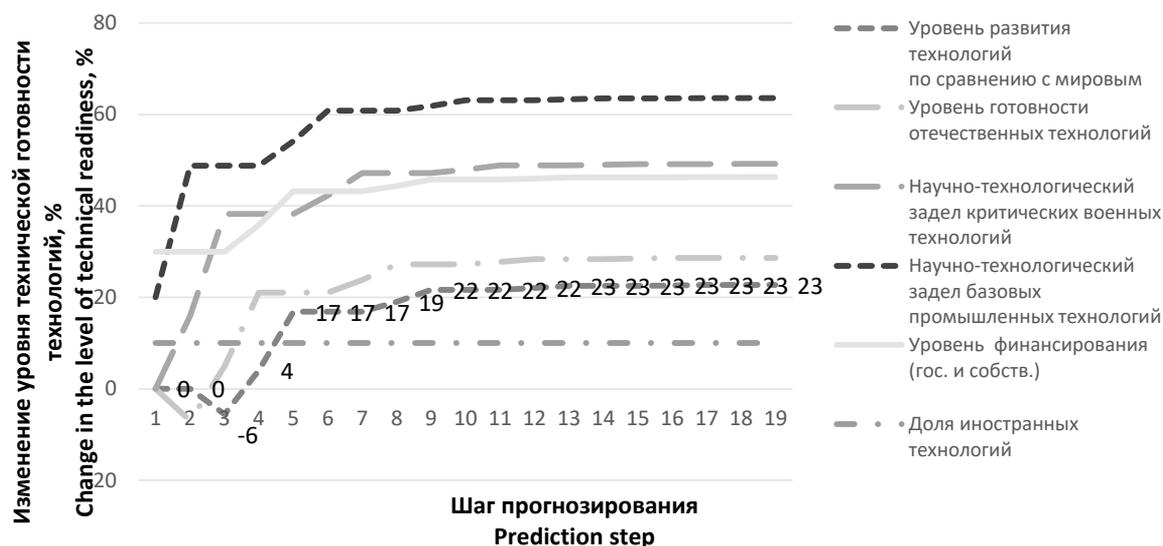


Рис. 6. Влияние факторов на уровень развития технологий по сравнению с мировым  
 Fig. 6. Influence of factors on the level of technology development in comparison with the world

Таблица 3. Сценарии развития ситуации  
 Table 3. Scenarios for the development of the situation

Факторы влияния (%) Influencing factors (%)	Сценарий 1 Scenario 1	Сценарий 2 Scenario 2	Сценарий 3 Scenario 3	Сценарий 4 Scenario 4	Сценарий 5 Scenario 5
Уровень развития технологий по сравнению с мировым The level of technology development compared to the world	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Уровень готовности отечественных технологий The level of readiness of domestic technologies	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Окончание таблицы 3

Факторы влияния (%) <i>Influencing factors (%)</i>	Сценарий 1 <i>Scenario 1</i>	Сценарий 2 <i>Scenario 2</i>	Сценарий 3 <i>Scenario 3</i>	Сценарий 4 <i>Scenario 4</i>	Сценарий 5 <i>Scenario 5</i>
Научно-технологический задел критических военных технологий <i>Scientific and technological reserve of critical military technologies</i>	0,0	20,0	20,0	25,0	20,0
Научно-технологический задел базовых промышленных технологий <i>Scientific and technological reserve of basic industrial technologies</i>	20,0	15,0	15,0	15,0	30,0
Уровень финансирования <i>Funding level</i>	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0
Кадровый потенциал <i>Personnel potential</i>	0,0	0,0	10,0	0,0	10,0
Доля иностранных технологий <i>Share of foreign technologies</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Интенсивность процессов диверсификации <i>Intensity of diversification processes</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Объем выпускаемой продукции <i>Output volume</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Для оценки эффективности управленческих решений разработана система показателей, характеризующих:

- степень достижения цели – коэффициент целедостижения;
- степень благоприятности ситуации для лиц, принимающих решения (ЛПР), – коэффициент благоприятности ситуации;
- объем и ценность ресурсов, необходимых для реализации управленческого решения, – ресурсоемкость управленческого решения;
- коэффициент эффективности управленческого решения, характеризующий отношение степени достижения целей к объему и ценности ресурсов, необходимых для реализации соответствующего управленческого решения.

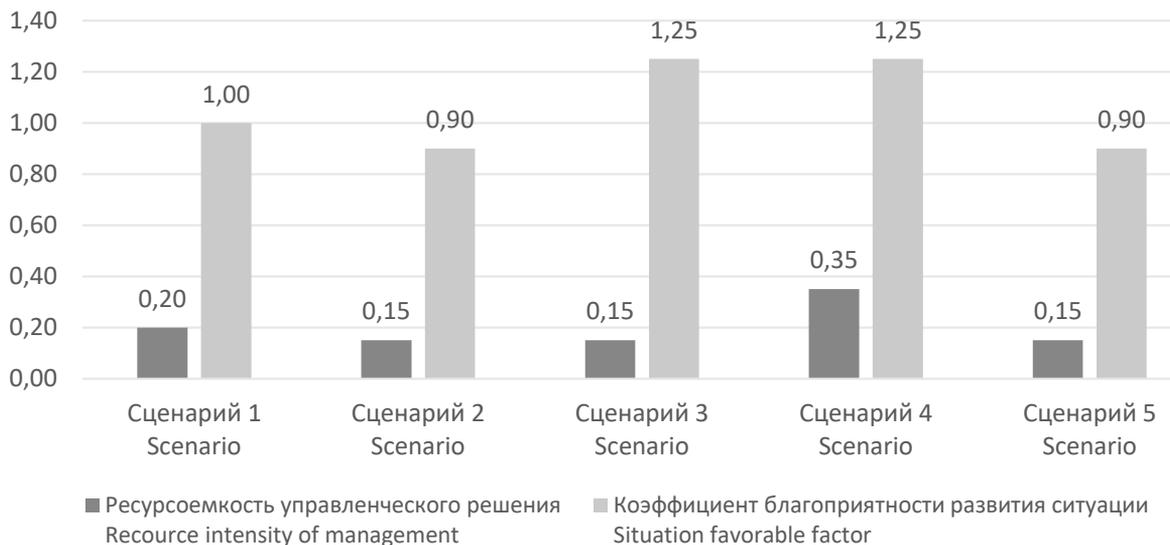
Сравнение эффективности управленческих решений при оценке и интерпретация результатов моделирования представлены на рисунке 7.

Значения коэффициента эффективности управленческих решений для выбранных пяти сценариев развития ситуации представлены на рисунке 8.

Из рисунка 8 видно, что наиболее эффективным является второй сценарий развития. Такая структуризация позволяет более четко определить характер и силу взаимодействия факторных переменных в когнитивной модели. Это поможет оценить и спрогнозировать будущие изменения, дать надлежащие рекомендации научным учреждениям в ключевых областях, таких как промышленность, военное вооружение и специальная техника, космические системы, авиация, энергетика и др.

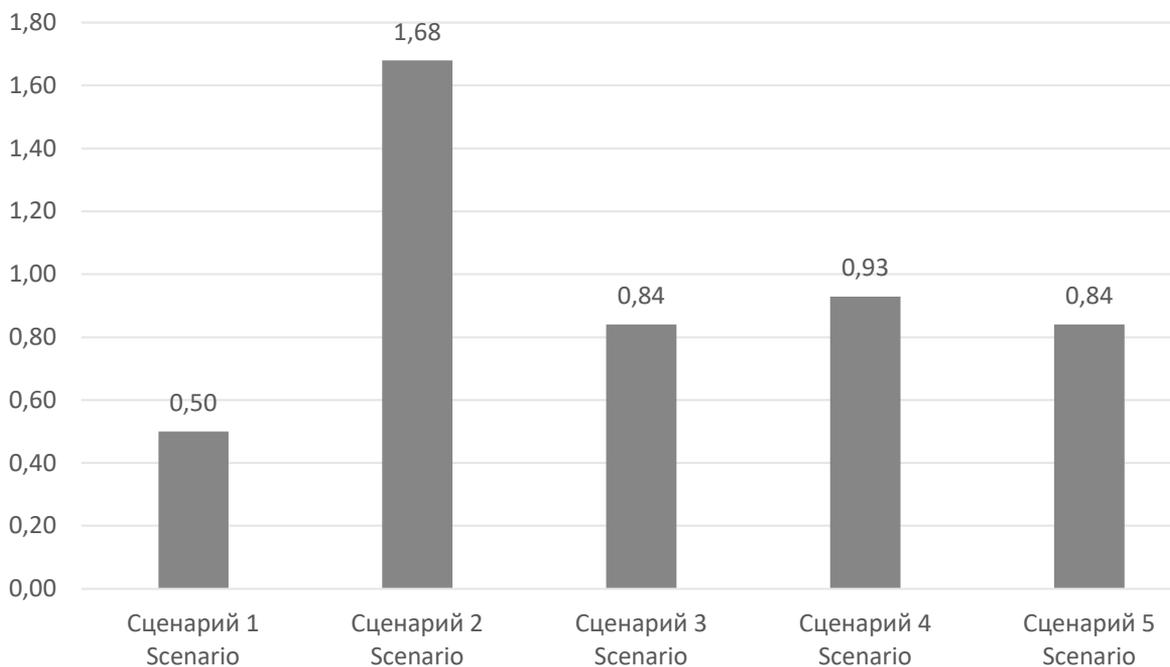
## Обсуждение

Проведенный анализ показал наличие больших возможностей использования технологий ИИ для научно-технологического прогнозирования. Наиболее часто они используются при обработке временных ря-



**Рис. 7.** Значение коэффициента благоприятности развития ситуации и ресурсоемкости управленческого решения

**Fig. 7.** The value of the coefficient of favorable development of the situation and the resource intensity of the management decision



**Рис. 8.** Сравнение эффективности управленческих решений

**Fig. 8.** Comparison of the effectiveness of management decisions

дов, прогнозировании наступления каких-либо технических или социальных событий. Информации об использовании технологий искусственного интеллекта при формировании научно-технологического прогноза крайне мало.

Отличия проведенного исследования от известных заключается в определении возможностей использования технологий искусственного интеллекта на различных этапах формирования прогноза развития науки, техники и технологий.

Авторами обоснована целесообразность применения при научно-технологическом прогнозировании нечеткой логики в сочетании с другими технологиями ИИ, поскольку имеют место ситуации, в которых точно не известны исходные данные, а результаты прогноза носят обобщенный характер.

Подспорьем для решения задач построения когнитивных карт, определения уровня развития технологий, степени взаимного влияния факторов, выявления факторов и оценки их влияния на уровень развития технологий может стать программный комплекс сбора и обработки данных. Программный комплекс решает следующие функциональные задачи (рис. 9):

- сбор, хранение и обработку интегрированной информации.

С применением специального программного обеспечения держателем информационного ресурса осуществляется сбор данных из различных источников с последующей формализацией в виде показателей (модели данных) и нормативно-справочной информации (НСИ);

- обеспечение удаленного доступа пользователей к информации. Осуществляется посредством подключения клиента к серверу.

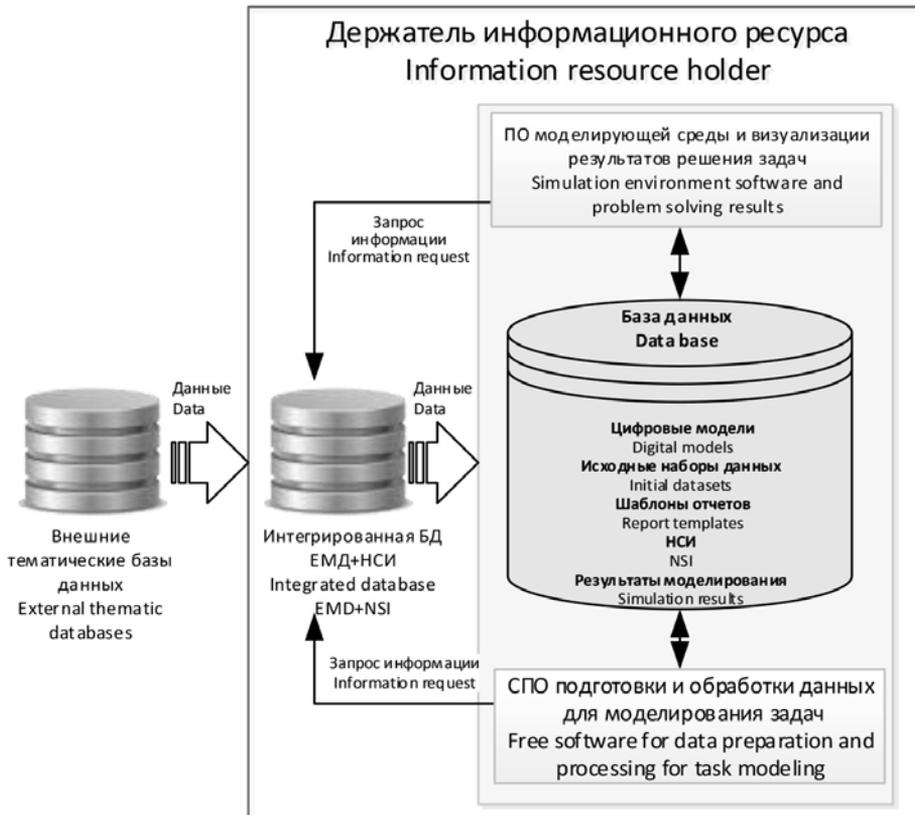


Рис. 9. Укрупненная схема информационно-аналитического взаимодействия

Fig. 9. Enlarged scheme of information and analytical interaction

ру с развернутой на нем базой данных (интегрированная база данных);

- формирование информационно-аналитических материалов (включая визуализацию). В клиентской части развернуто специальное программное обеспечение, осуществляющее чтение, обработку и представление данных, расположенных в интегрированной БД. Формирование отчетных материалов осуществляется с применением модуля визуализации информации, заготовленных форм и моделей;
- формирование и предоставление (включая печать) выходных документов (отчетов, справок, информационно-аналитических материалов), в том числе выгрузка в формате Microsoft Excel;
- обеспечение информационной поддержки принятия решений по результатам мониторинга информации.

Отличия предложений авторов от известных также заключаются в разработанных практических рекомендациях по системному информационному обеспечению процесса формирования научно-технологического прогноза в единой информационной среде. Информационные технологии поддержки принятия решений представляют собой целый класс программных систем, призванных облегчить работу аналитиков. Такие системы называют системами поддержки принятия решений – СППР (DSS, Decision Support System) (рис. 10).

В состав этой системы входят:

- подсистема оперативной аналитической обработки данных OLAP (Online analytical processing), которая использует многомерное представление данных;
- подсистема интеллектуального анализа больших данных Data Mining;

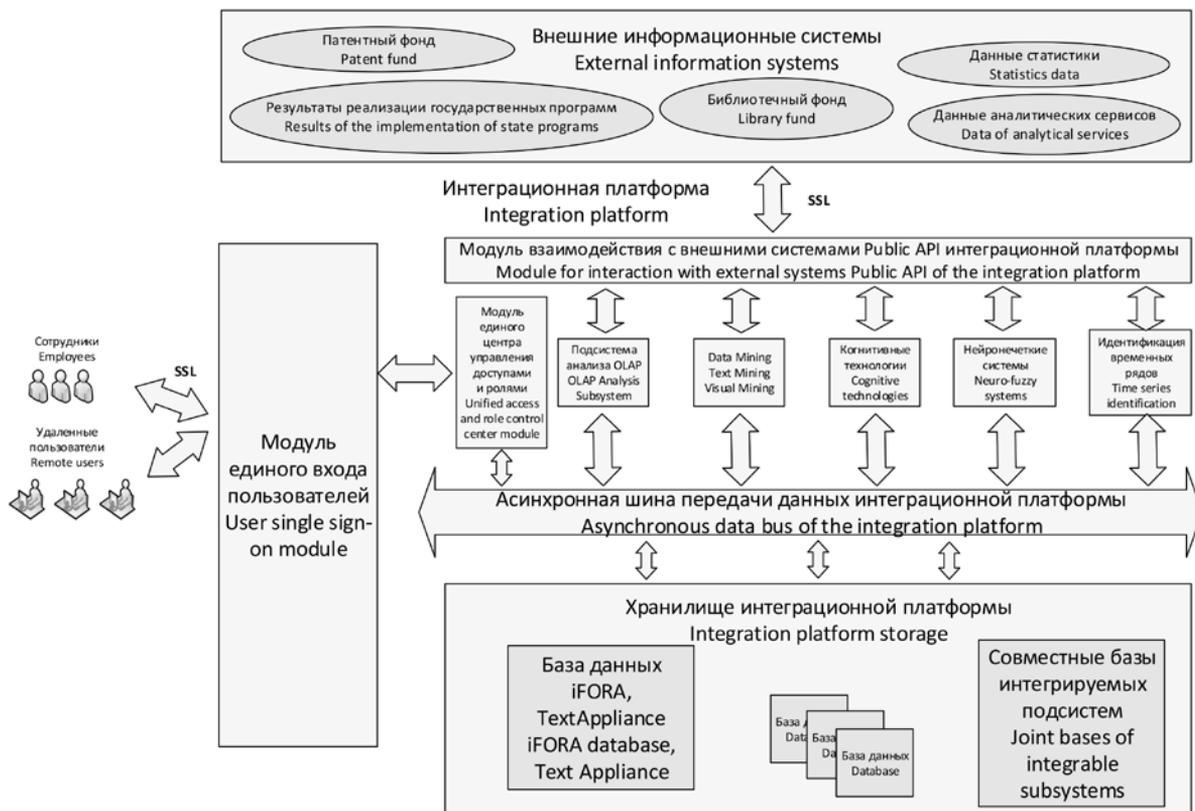


Рис. 10. Система поддержки принятия решения на основе использования искусственного интеллекта  
 Fig. 10. Decision support system based on the use of artificial intelligence

- подсистема анализа неструктурированного текста Text Mining;
- подсистема визуального анализа данных Visual Mining;
- подсистема построения когнитивных карт;
- нейронечеткие системы для организации нейросетевого анализа данных.

Системы поддержки принятия решений часто используют прогнозирование временных рядов, поэтому точность таких систем имеет первостепенное значение для их эффективности. Поскольку в настоящее время большинству систем требуется обработка больших объемов данных, возросла необходимость автоматической идентификации моделей временных рядов. Эту задачу успешно решает ИИ.

Создание системы информационного обеспечения прогнозных исследований в части направлений проведения фундаментальных и поисковых научных исследований позволит вывести прогнозирование результатов фундаментальных научных исследований на новый качественный уровень, повысить достоверность прогноза, а также существенно сократить используемые ресурсы на обеспечение процессов формирования прогнозов.

## Заключение

В результате проведенного исследования авторами была доказано, что использование технологий ИИ на этапах научно-технологического прогнозирования позволит существенно ускорить процесс формирования

прогноза, повысить его качество и достоверность, а также снизить финансовые и материальные затраты на проведение научно-технического прогнозирования.

Наиболее подходящими для использования при формировании научно-технологических прогнозов являются семантический анализ больших данных, методы нечеткой логики, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, когнитивные технологии. При формировании научно-технологических прогнозов могут быть применены автоматизированные системы поддержки принятия решений на основе использования искусственного интеллекта, прогностические системы, предикативная аналитика. Для единства терминологии целесообразно использование онтологических концепт-карт. Для повышения достоверности и точности прогноза могут быть использованы гибридные модели ИИ, минимизирующие факторы неопределенности, алгоритмы оптимизации на основе использования моделей ИИ, а также верификация результатов прогноза с использованием инструментов теории решения изобретательских задач [18].

Проведенные исследования были ограничены разработкой общих и концептуальных вопросов использования технологий ИИ при научно-технологическом прогнозировании. При этом технологии ИИ, которые возможно использовать при формировании научно-технологического прогноза, описаны в общем виде, и приведены ссылки на источники, где более подробно раскрывается возможность их использования при прогнозировании.

## Список литературы

1. Указ Президента РФ от 2 июля 2013 г. № 599 «О разработке и реализации государственной программы вооружения» // СПС «КонсультантПлюс».
2. Прогноз научно-технологического развития России – 2030 / под ред. Л.М. Гохберга. – М.: Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2014. – 244 с.
3. ГОСТ Р 59895–2021. Технологии искусственного интеллекта в образовании. Общие положения и терминология. – М.: Росстандарт, 2021. – 12 с.
4. Поляков А. Прогноз развития технологии искусственного интеллекта на 2019. Шесть приоритетных направлений развития ИИ, которые нельзя игнорировать. Исследование компании PwC [Электронный ресурс] // PwC. URL: [https://filearchive.cnews.ru/img/files/2019/04/17/4.\\_polyakov\\_anatolij.pdf](https://filearchive.cnews.ru/img/files/2019/04/17/4._polyakov_anatolij.pdf) (дата обращения: 04.08.2022).

5. Хитрова Т. И., Черников Д. В. Модификация маркетинговой информационной системы на основе интеллектуальных компонент // *Baikal Research Journal*. 2015. Т. 6. № 4. С. 19. DOI: 10.17150/2411-6262.2015.6(4).19.
6. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.
7. Бельх Т. И., Бурдуковская А. В. Использование способа реализации искусственного интеллекта в прогнозировании // *Известия Байкальского государственного университета*. 2018. Т. 28. № 3. С. 500–507. DOI: 10.17150/2500-2759.2018.28(3).500-507.
8. Masood A., Kafeel A. A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 322. Article 129072. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129072.
9. Dobrzański L. A., Trzaska J., Dobrzańska-Danikiewicz A. D. 2.09 – Use of neural networks and artificial intelligence tools for modeling, characterization, and forecasting in material engineering // *Comprehensive Materials Processing*. 2014. Vol. 2. P. 161–198. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00215-6.
10. Когнитивные системы мониторинга и прогноза научно-технологического развития государства / под ред. В. И. Сырямкина. – Томск: ТГУ, 2012. – 357 с.
11. iFORA: трехмерный взгляд на растущие области науки и технологий [Электронный ресурс] // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». URL: <https://issek.hse.ru/news/254274661.html> (дата обращения: 05.11.2021).
12. Голубев С. С., Чеботарев В. С. Современные факторы обеспечения национальной безопасности // *Журнал прикладных исследований*. 2021. Т. 3. № 2. С. 55–61. DOI: 10.47576/2712-7516\_2021\_2\_3\_55.
13. Любимова Т. В., Горелова А. В. Решение задачи прогнозирования с помощью нейронных сетей // *Международный научный журнал «ИННОВАЦИОННАЯ НАУКА»*. 2015. Т. 2. № 4. С. 39–43.
14. Cox E. Fuzzy modeling and genetic algorithms for data mining and exploration. A volume in The Morgan Kaufmann series in data management systems. 2005. P. 517–530. DOI: 10.1016/B978-0-12-194275-5.X5000-2.
15. Gorbachev S., Syryamkin M., Syryamkin V., Vaganova E. Cognitive neural network foresight to forecast scientific and technological development of the state // *Procedia – social and behavioral sciences*. 2015. Vol. 206. P. 378–382. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.10.069.
16. Zare S. G., Alipour M., Hafezi M., Stewart R. A., Rahman A. Examining wind energy deployment pathways in complex macro-economic and political settings using a fuzzy cognitive map-based method // *Energy*. 2022. Vol. 238. Part A. Article 121673. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121673.
17. Голубев С. С. Управление промышленными технологиями: монография. – М.: ФГУП «ВНИИ «Центр», 2019. – 283 с.
18. Golubev S. S., Sekerin V. D., Gorokhova A. E., Komlatskiy G. V., Arutyunyan Y. I. Analysis of the current state and forecast of cast iron production in Russia // *Archives of Foundry Engineering*. 2021. Vol. 21. Iss. 2. P. 70–74.

## Сведения об авторах

Голубев Сергей Сергеевич, ORCID 0000-0001-8745-6235, докт. экон. наук, профессор, кафедра экономики и организации, Московский политехнический институт; начальник отдела прогнозирования развития науки, Центр прогнозирования, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт "Центр"», Москва, Россия, [sergei.golubev56@mail.ru](mailto:sergei.golubev56@mail.ru)

Афанасьев Александр Леонидович, ORCID 0000-0003-0222-246X, канд. техн. наук, руководитель Центра прогнозирования, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт "Центр"», Москва, Россия, [afal69@mail.ru](mailto:afal69@mail.ru)

Курицын Александр Викторович, ORCID 0000-0002-9018-424X, аспирант, начальник отдела прогнозирования развития технологий, Центр прогнозирования, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт "Центр"», Москва, Россия, [akuritsyn@vniicentr.ru](mailto:akuritsyn@vniicentr.ru)

Статья поступила 25.03.2022, рассмотрена 14.04.2022, принята 20.06.2022

## References

1. Decree of the President of the Russian Federation "On the development and implementation of the State Armament Program" of July 02, 2013 599 (in Russian). SPS «Konsul'tantPlyus».
2. *Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossii – 2030* [Forecast of scientific and technological development of Russia – 2030]. Ed. by L. M. Gokhberg. Moscow, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, National Research University "Higher School of Economics", 2014, 244 p.

3. *GOST R 59895–2021. Tekhnologii iskusstvennogo intellekta v obrazovanii. Obshchie polozeniya i terminologiya* [State Standard R 59895-2021. Artificial intelligence technologies in education. General provisions and terminology]. Moscow, Rosstandart Publ., 2021, 12 p.
4. Polyakov A. *Prognoz razvitiya tekhnologii iskusstvennogo intellekta na 2019. Shest' prioritnykh napravlenii razvitiya II, kotorye nel'zya ignorirovat'* [Forecast for the development of artificial intelligence technology for 2019. Six priority areas for the development of AI that cannot be ignored]. Available at: [https://filearchive.cnews.ru/img/files/2019/04/17/4.\\_polyakov\\_anatolij.pdf](https://filearchive.cnews.ru/img/files/2019/04/17/4._polyakov_anatolij.pdf) (accessed 04.08.2022).
5. Khitrova T. I., Chernikov D. V. Modification of marketing information system on the basis of intellectual component. *Baikal Research Journal*, 2015, vol.6, no.4, p.19 (in Russian). DOI: 10.17150/2411-6262.2015.6(4).19.
6. Galushkin A. I. *Neironnye seti: osnovy teorii* [Neural networks: fundamentals of theory]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2010, 496 p.
7. Belykh T. I., Burdukovskaya A. V. One of the ways of artificial intelligence implementation in forecasting. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*=Bulletin of Baikal State University, 2018, vol.28, no.3, pp.500-507 (in Russian). DOI: 10.17150/2500-2759.2018.28(3).500-507.
8. Masood A., Kafael A. A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol.322, article 129072. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129072.
9. Dobrzański L. A., Trzaska J., Dobrzańska-Danikiewicz A. D. 2.09 – Use of neural networks and artificial intelligence tools for modeling, characterization, and forecasting in material engineering. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol.2, pp.161-198. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00215-6.
10. *Kognitivnye sistemy monitoringa i prognoza nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya gosudarstva* [Cognitive systems for monitoring and forecasting the state's scientific and technological development]. Ed. by V. I. Syryamkin. Tomsk, TSU, 2012, 357 p.
11. *iFORA: trekhmernyi vzglyad na rastushchie oblasti nauki i tekhnologii* [iFORA: a three-dimensional view of the growing fields of science and technology]. National Research University Higher School of Economics. Available at: <https://issek.hse.ru/news/254274661.html> (accessed 05.11.2021).
12. Golubev S. S., Chebotarev V. S. Modern factors of ensuring national security. *Zhurnal prikladnykh issledovaniy*=Journal of Applied Research, 2021, vol.3, no.2, pp.55-61 (in Russian). DOI: 10.47576/2712-7516\_2021\_2\_3\_55.
13. Lyubimova T. V., Gorelova A. V. *Reshenie zadachi prognozirovaniya s pomoshch'yu neironnykh setei* [Solving the problem of forecasting with the help of neural networks]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal «INNOVATSIONNAYA NAUKA»*, 2015, vol.2, no.4, pp.39-43.
14. Cox E. Fuzzy modeling and genetic algorithms for data mining and exploration. A volume in The Morgan Kaufmann series in data management systems, 2005, pp.517-530. DOI: 10.1016/B978-0-12-194275-5.X5000-2.
15. Gorbachev S., Syryamkin M., Syryamkin V., Vaganova E. Cognitive neural network foresight to forecast scientific and technological development of the state. *Procedia – Social and behavioral sciences*, 2015, vol.206, pp.378-382. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.10.069.
16. Zare S. G., Alipour M., Hafezi M., Stewart R. A., Rahman A. Examining wind energy deployment pathways in complex macro-economic and political settings using a fuzzy cognitive map-based method. *Energy*, 2022, vol.238, part A, article 121673. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121673.
17. Golubev S. S. *Upravlenie promyshlennymi tekhnologiyami: monografiya* [Industrial technology management: monograph]. Moscow, FGUP "VNIITsentr" Publ., 2019, 283 p.
18. Golubev S. S., Sekerin V. D., Gorokhova A. E., Komlatskiy G. V., Arutyunyan Y. I. Analysis of the current state and forecast of cast iron production in Russia. *Archives of Foundry Engineering*, 2021, vol.21, iss.2, pp.70-74.

## About the authors

*Sergei S. Golubev*, ORCID 0000-0001-8745-6235, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Economics and Organization Department, Moscow Polytechnic Institute; Head of the Forecasting the Development of Science Department, Forecasting Center, Federal State Unitary Enterprise "AH-Russia and research institute "Center", Moscow, Russia, [sergei.golubev56@mail.ru](mailto:sergei.golubev56@mail.ru)  
*Alexander L. Afanasiev*, ORCID 0000-0003-0222-246X, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Center for Forecasting, Federal State Unitary Enterprise "AH-Russia and research institute "Center", Moscow, Russia, [afal69@mail.ru](mailto:afal69@mail.ru)  
*Alexander V. Kuritsyn*, ORCID 0000-0002-9018-424X, Postgraduate, Head of the Technology Development Forecasting Department, Forecasting Center, Federal State Unitary Enterprise "AH-Russia and research institute "Center", Moscow, Russia, [akuritsyn@vniicentr.ru](mailto:akuritsyn@vniicentr.ru)

Received 25.03.2022, reviewed 14.04.2022, accepted 20.06.2022

# Имитационная модель беспроводной ad-hoc сети для исследования алгоритмов маршрутизации трафика

М. С. Пестин<sup>1\*</sup>, А. С. Новиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

\*maxime1996rus@mail.ru

**Аннотация.** Имитационные симуляторы сетей связи представляют собой программное обеспечение, предназначенное для моделирования, исследования, тестирования и отладки сетевых технологий, включая беспроводные децентрализованные самоорганизующиеся сети, или ad-hoc сети. Они существенно упрощают исследование, разработку и оптимизацию протоколов маршрутизации в указанных сетях. Однако известные программы-симуляторы обладают рядом недостатков, включая сложность добавления пользовательских расширений протоколов маршрутизации ad-hoc сетей, отсутствие необходимого сетевого стека и режимов визуализации алгоритмов маршрутизации, низкую производительность, сложность в отладке протоколов связи. Целью проведенной работы является создание имитационной модели беспроводной сети, которая позволяла бы исследовать, отлаживать и производить оценку разрабатываемых алгоритмов и протоколов маршрутизации ad-hoc сетей. При этом на первый план выходят требования к эргономике интерфейса и возможности визуализации работы алгоритмов, обеспечению сбора статистики, созданию разнообразных сценариев функционирования сети. В статье предлагается структура имитационной модели, которая включает модули сетевого абонента, прикладного программного обеспечения, сетевого уровня модели передачи данных OSI, радиомодуля, среды радиопередачи, сбора статистики, визуализации и управления сценариями. Чтобы решить поставленные задачи был использован подход дискретно-событийного моделирования. Для создания симулятора беспроводных децентрализованных сетей и алгоритмов маршрутизации был разработан набор классов, которые реализуют модули имитационной модели. На основе предложенной структуры, классов модулей и алгоритма дискретно-событийного моделирования была создана программная реализация имитационной модели с использованием языка программирования C++ и фреймворка Qt. Разработанная имитационная модель была использована в ходе экспериментального исследования эффективности алгоритма сетевой маршрутизации. Предложенное программное обеспечение позволит упростить разработку и отладку алгоритмов и протоколов маршрутизации ad-hoc сетей.

**Ключевые слова:** сетевой симулятор, беспроводная ad-hoc сеть, маршрутизация трафика, протокол маршрутизации, имитационное моделирование, сетевая модель передачи данных

**Для цитирования:** Пестин М. С., Новиков А. С. Имитационная модель беспроводной ad-hoc сети для исследования алгоритмов маршрутизации трафика // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 75–86.  
DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-75-86

# Simulation model of wireless ad-hoc network to study algorithms of traffic routing

M. Pestin<sup>1\*</sup>, A. Novikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tula State University, Tula, Russia

\* maxime1996rus@mail.ru

**Abstract.** Communication network simulators are software designed to model, explore, test and debug network technologies, including wireless decentralized self-organizing networks or ad-hoc networks. They greatly simplify the research, development and optimization of routing protocols in these networks. However, the well-known simulators have a number of disadvantages, including the difficulty of adding custom extensions to ad-hoc network routing protocols, the lack of the necessary network stack, the lack of routing algorithm visualization modes, low performance, and difficulty in debugging communication protocols. The purpose of this work is to create a simulation model of a wireless network that would allow us to explore, debug and evaluate the developed algorithms and routing protocols for ad-hoc networks. At the same time, the requirements for interface ergonomics and the ability to visualize the operation of algorithms, ensure the collection of statistics, and create various scenarios for the operation of the network come to the fore. The article proposes the structure of the simulation model, which includes the modules of the network subscriber, application software, network layer of the OSI data transmission model, radio module, radio transmission environment, statistics collection, visualization and scenario management. To solve the tasks set, the approach of discrete-event modeling was used. To create a simulator of wireless decentralized networks and routing algorithms, a set of classes was developed that implement the modules of the simulation model. Based on the proposed structure, module classes and discrete event simulation algorithm, a software implementation of the simulation model was created using the C++ programming language and the Qt framework. The developed simulation model was used in the course of an experimental study of the effectiveness of the network routing algorithm. The proposed software will simplify the development and debugging of algorithms and routing protocols for ad-hoc networks.

**Keywords:** network simulator, wireless ad-hoc network, traffic routing, routing protocol, simulation modeling, network data transfer model

**For citation:** Pestin M., Novikov A. Simulation model of wireless ad-hoc network to study algorithms of traffic routing. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.75-86 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-75-86

## Введение

Беспроводные децентрализованные самоорганизующиеся сети (они же – беспроводные ad-hoc сети, беспроводные одноранговые сети) – современный подход организации беспроводных телекоммуникаций, особенностью которого является

отсутствие потребности в специальной инфраструктуре, а также высокая отказоустойчивость сетей за счет отсутствия единого управляющего центрального узла. Для их организации используются специальные алгоритмы и протоколы маршрутизации (ad-hoc routing protocol), которые обеспечивают поддержание связей и маршрутов между абонентами сети [3, 11].

Основными преимуществами применения ad-hoc сетей, по сравнению с технологиями классической беспроводной связи, являются возможность передачи данных на значительные расстояния без высоких затрат электроэнергии, отсутствие необходимости в дополнительной инфраструктуре при масштабировании сети и добавлении в нее новых абонентов, высокая скорость и простота развертывания сети, устойчивость к изменению топологии связей между абонентами, а также отсутствие единого управляющего центра, от функционирования которого зависела бы корректность работы всей сети в целом. По сравнению с родственной технологией mesh сетей, ad-hoc сети предполагают, что любые найденные маршруты имеют относительно низкое время жизни (вплоть до десятков секунд), абоненты являются не стационарными и могут иметь высокую динамику включения и отключения от сети, при этом трафик может передаваться между любой парой абонентов, между любой парой узлов. Это обеспечивается специальными алгоритмами и протоколами ad-hoc маршрутизации.

Несмотря на повсеместное распространение мобильной сотовой связи, в настоящее время имеются значительные территории с неразвитой информационно-коммуникационной инфраструктурой. При этом альтернатива в виде спутниковой связи остается достаточно дорогостоящей и требует наличия специализированного оборудования. Поэтому ввиду своих преимуществ, указанных ранее, беспроводные ad-hoc сети все больше находят свое применение для организации связи между мобильными абонентами, выполняющими некоторые групповые задачи. К таковым можно отнести мобильных роботов, беспилотные транспортные средства, беспилотные летательные аппараты, транспорт спасательных служб, работающих в удаленных регионах.

В настоящее время существует множество сетевых симуляторов [5, 1], которые позволяют исследовать, разрабатывать, на-

страивать и оценивать протоколы маршрутизации ad-hoc сетей. Среди симуляторов можно выделить как пакеты для моделирования компьютерных сетей в целом (NS-2, NS-3, Omnet++, OPNET), так и специализированное программное обеспечение, предназначенное для моделирования ad-hoc сетей (Dingo, J-Sim).

При разработке новых протоколов маршрутизации требуется их проверка и отладка в сетевом симуляторе. Большинство инструментариев не позволяет добавлять пользовательские реализации протоколов связи (например, Cisco Packet Tracer, OPNET). Имеющие такую функцию прикладные пакеты программного обеспечения позволяют встраивать протокол лишь в стандартный сетевой стек TCP/IP, хотя целевая среда функционирования пользовательского протокола может иметь совершенно иной набор сетевых технологий. При отладке и исследовании протокола связи может возникнуть потребность в наблюдении за определенными этапами процесса поиска маршрута между конкретными узлами, передачи данных в рамках одного маршрута или пакета с последующим визуальным отображением указанных процессов. Существующие средства мониторинга, такие как Zabbix или Wireshark, способны анализировать трафик непосредственно на реальном сетевом оборудовании и не способны взаимодействовать с симуляторами сетей. Свободно доступные системы моделирования NS2 и NS3 не имеют встроенного графического интерфейса. Omnet++ производит визуализацию передачи пакетов по сети, однако не позволяет отдельно выделять трафик между указанными узлами. Кроме того, высокая степень детализации существующих моделей может затруднить отладку протоколов связи на начальном этапе разработки. Из-за проблем и ошибок на транспортном, канальном и физическом уровнях сетевого стека будет затруднительно определить, какие ошибки в передаче данных вызваны на уровне маршрутизации.

Поэтому возникает потребность в собственной имитационной среде для моделирования беспроводных децентрализованных сетей связи, в которой бы преодолевались указанные выше недостатки. Она должна предоставлять возможность произвести исследование и оценку разработанного протокола маршрутизации.

### Структура имитационной модели ad-hoc сети

Имитационная модель беспроводной децентрализованной самоорганизующейся сети необходима для исследования, моделирования, определения основных параметров, отладки и оценки разрабатываемых протоколов маршрутизации в беспроводных одноранговых сетях. Помимо этого, модель должна:

- осуществлять визуализацию функционирования алгоритмов поиска маршрутов и передачи данных по сети;
- обеспечивать сбор основных показателей качества работы ad-hoc сети и отдельных

узлов, таких как время обнаружения маршрута, время доставки данных, коэффициент доставки данных, загрузка сети и отдельных каналов связи;

- позволять задавать сценарии работы сети, включая установление и разрыв связей между абонентами, отправку прикладного трафика.

В связи с данными требованиями авторами предлагается имитационная модель со структурой, представленной на рисунке 1.

В состав имитационной модели входят:

- модель сетевого узла;
- модель среды радиопередачи;
- модуль сценариев;
- модуль сбора статистики;
- модуль визуализации.

Симуляцию абонентов ad-hoc сети обеспечивает модель сетевого узла. Она состоит из модулей прикладного программного обеспечения, сетевого уровня стека протоколов OSI [4] и радиомодуля. Модель прикладного программного обеспечения предназначена для генерации прикладного трафика сети по

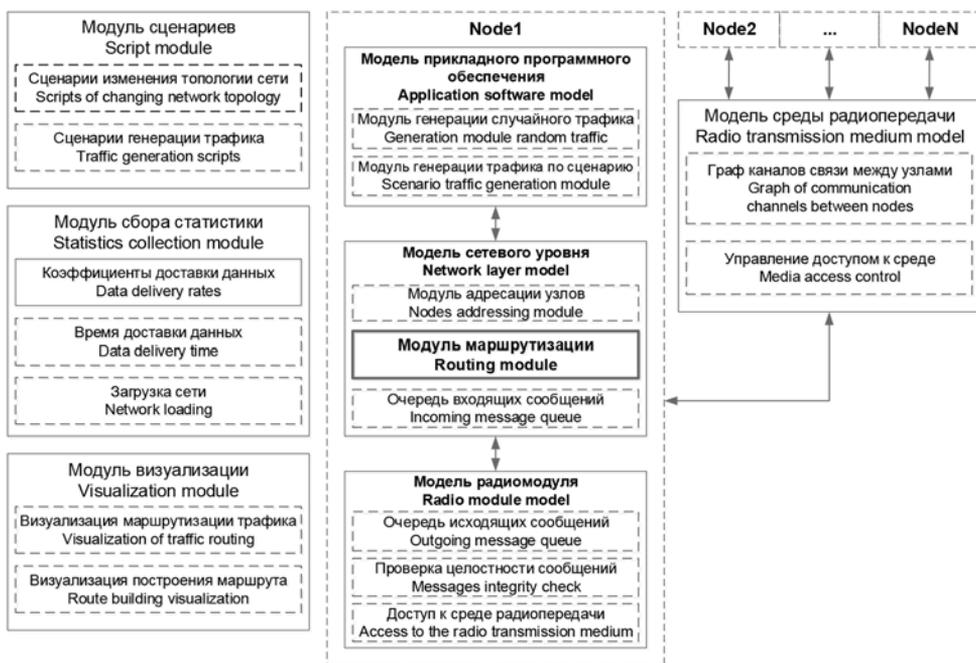


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели  
Fig. 1. Structural scheme of the simulation model

встроенным или задаваемым пользователями сценариям. Такой трафик может быть периодическим либо генерироваться по равномерному или экспоненциальному закону распределения [10].

Модель сетевого уровня предназначена для маршрутизации трафика по сети. В данной работе она также имеет функцию протоколов транспортного уровня – сборка фрагментированных пакетов при необходимости. Ключевой структурной единицей здесь является модуль маршрутизации, именно он обеспечивает обнаружение путей между узлами и пересылку данных между ними. Он является программной реализацией разрабатываемого протокола маршрутизации. Принимаемые от модели радиомодуля пакеты накапливаются в очереди входящих сообщений. Также на сетевом уровне производится назначение узлам сетевых адресов. Адреса узлов в ходе моделирования могут быть или статически заданы во входном файле (аналог MAC-адреса сетевых устройств), или автоматически назначаться новым абонентам при подключении к сети имитационной системой с динамическим освобождением пула адресов при их отключении.

Симуляция протоколов канального и физического уровней обеспечивается моделью радиомодуля. Здесь производится формирование контрольной суммы для исходящих сообщений, а также осуществляется проверка для входящих. Для упрощения модели адреса физического уровня принимаются аналогично сетевым адресам. Взаимодействие с моделью среды радиопередачи осуществляется через радиомодуль, поэтому все переданные сообщения накапливаются в очереди исходящих сообщений.

В основе модели среды радиопередачи лежит граф каналов связи между узлами. Канал характеризуются надежностью – долей пакетов данных, которые достигнут получателя, а также скоростью передачи данных. Для упрощения модели радиомодуля функция

контроля доступа к среде выведена в модель среды радиопередачи.

Модуль сценариев предназначен для управления сценариями работы модели, а именно генерации прикладного трафика и изменения топологии сети. Статистика собирается и агрегируется при помощи соответствующего модуля. Он должен позволять определять коэффициенты доставки данных, время доставки данных по отдельным маршрутам и между конкретными абонентами, а также загрузку каналов связи и сети в целом. Модуль визуализации должен обеспечивать демонстрацию процессов построения маршрутов и доставки данных между заданными абонентами.

Указанные модули позволяют реализовать систему имитационного моделирования функционирования протоколов маршрутизации беспроводных ad-hoc сетей для оценки их производительности и отладки работы. Поскольку во многих случаях нам будет требоваться производить оптимизацию протокола связи [2, 12], проектируемая система моделирования будет дискретно-событийной [13]. Это обеспечит логическую и физическую непротиворечивость последовательности событий в сети при отработке различных сценариев ее функционирования, а также позволит сократить время прогона модели.

## Алгоритм маршрутизации трафика в ad-hoc сетях

Авторами статьи был предложен алгоритм маршрутизации трафика в беспроводной децентрализованной самоорганизующейся сети передачи данных. Схема функционирования алгоритма при поиске маршрута между узлами S и D представлена на рисунке 2. Его работа состоит из двух этапов.

На первом этапе производится широковещательная рассылка пакетов RouteSearch с целью выявления наиболее пригодных для маршрутизации направлений пересылки. Информация о формируемых маршрутах на-

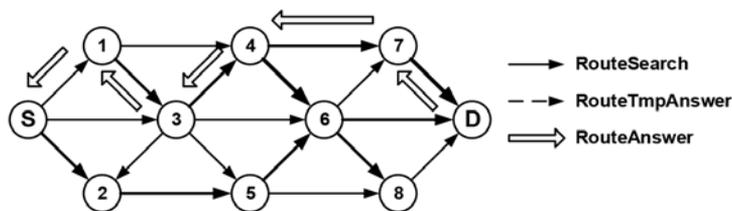


Рис. 2. Схема функционирования протокола маршрутизации  
 Fig. 2. Scheme of functioning of the routing protocol

капливается в RouteSearch. Абонент, принимая пакеты RouteSearch, сравнивает и сортирует частично сформированные маршруты по некоторому критерию  $F_s(X)$ , где  $X$  – вектор маршрутных метрик. Чем толще входящая линия на рисунке 2, тем более качественным по критерию  $F_s(X)$  является входящий частично сформированный маршрут.

Если один из пакетов RouteSearch достигает абонента D, то считается, что сформирован временный маршрут  $Route_T$  от S к D путем отправки пакета RouteTmpAnswer. Критерием его эффективности является наименьшее время обнаружения маршрута. Однако данный маршрут не является оптимальным по критерию  $F_s(X)$ . По сути, обнаружение маршрута  $Route_T$  аналогично стандартным подходам маршрутизации, заложенным в таких протоколах, как AODV, DSR [6, 7, 9].

После некоторого периода узел D инициирует построение оптимального маршрута. Для этого производится обратная рассылка пакета

RouteAnswer в направлении наилучших входящих частичных маршрутов. При достижении пакетом RouteAnswer абонента S маршрут считается сформированным. Данный маршрут далее будем называть постоянным.

В данной работе используется следующая функция  $F_s(X)$ :

$$F_s(X) = R_{R_{1,2}} \times R_{R_{2,3}} \times R_{R_{N-1,N}} \times R_{R_{Q1}} \times R_{R_{Q2}} \times \dots \times R_{R_{QN}}$$

где  $N$  – количество узлов в маршруте;

$(1 - R_{R_{Qi}})$  – вероятность пакета с данными быть отброшенным из очереди сообщения из-за перегрузок на узле  $i$ ;

$R_{R_{i,i+1}}$  – надежность канала связи между  $i$ -м и  $i+1$  узлами маршрута.

### Программная реализация имитационной модели

Для реализации дискретно-событийной системы моделирования используются классы, представленные на рисунке 3.

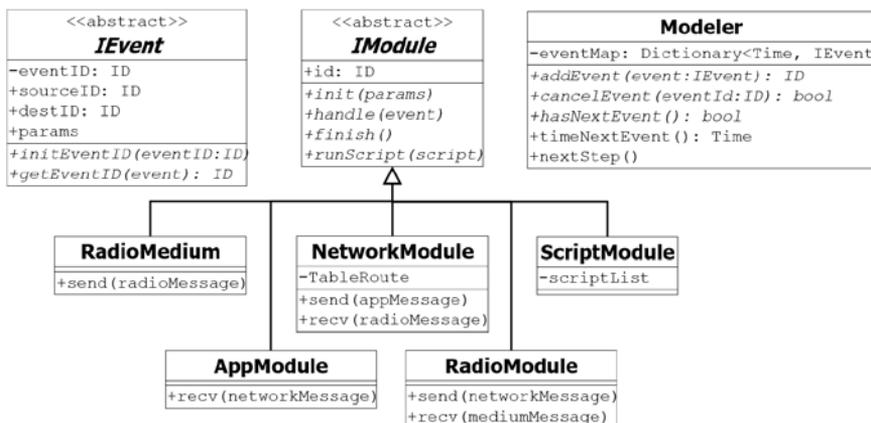


Рис. 3. Диаграмма классов модели  
 Fig. 3. Class scheme of model

Класс `IModule` предоставляет интерфейс для модулей в системе моделирования. Класс `RadioMedium` реализуют модель среды радиопередачи. Классы `AppModule`, `NetworkModule` и `RadioModule` реализуют соответствующие подмодули модели сетевого узла. Для их взаимодействия используются методы `send()` и `recv()`. Название сообщения указывает на отправителя. Управление сценариями реализовано в классе `ScriptModule`.

Каждый модуль имеет уникальный идентификатор `ID`, по которому его можно однозначно определить. При помощи метода `init()` производится их инициализация соответствующими параметрами. Для обработки событий вызывается метод `handle()`. При завершении моделирования должен быть вызван метод `finish()`, в котором при взаимодействии с модулем статистики определяются результаты моделирования. Для запуска сценария менеджер сценариев может вызвать `runScript()` на нужном модуле.

Абстрактный класс `IEvent` содержит базовую информацию о событии. Он включает идентификаторы события `eventID`, модуля-инициатора события `sourceID` и модуля-обработчика события `destID`, а также параметры. Для управления процессом моделирования используется класс `Modeler`. Он содержит словарь событий, где в качестве ключа выступает время наступления события. Методы `addEvent()` и `cancelEvent()` используются для создания и отмены событий на модулях в методах `init()` или `handle()`. Методы `hasNextEvent()` и `timeNextEvent()` используются для проверки наличия запланированных событий и возврата времени возникновения следующего события. Для выполнения следующего шага моделирования может быть использован метод `nextStep()`.

В моделировании задействованы следующие глобальные переменные:

- `Modeler modeler`;
- `ScriptModule scripts`;
- `MediumModule medium`;
- `List<Node> nodeList[N]`, где `N` – количество узлов сети, `Node` – кортеж (`AppModule`

`app`, `NetworkModule netw`, `RadioModule radio`);

- `Time timeLimit` – виртуальное время, в течение которого производится моделирование функционирования ad-hoc сети.

Используя представленные типы данных и переменные, дискретно-событийное моделирование производится по алгоритму, представленному на рисунке 4.

В качестве входных и выходных данных модели выступают файлы `init.xml` и `finish.xml`. Первый содержит первоначальные настройки сети, параметры и сценарии моделирования, второй – результаты моделирования. Имитационная модель была написана на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt5 [8]. Интерфейс программного обеспечения представлен на рисунке 5.

Представленный симулятор позволяет производить моделирование в трех режимах: с визуализацией, без визуализации, без логирования. В первом режиме имеется возможность визуально отслеживать процессы поиска маршрутов и доставки данных между выбранными узлами. Для этого необходимо выставить соответствующие номера узлов `S` и `D` в графах «S:» и «D:». Установленный коэффициент в меню «Скорость визуализации» указывает, с какой скоростью относительно базовой будет воспроизводиться анимация. Визуализация осуществляется либо при поиске маршрута (режим «Поиск/Search»), либо при передаче данных (режим «Передача/Transfer», рис. 6). Третий режим отличается от второго отсутствием логирования, что ускоряет процесс моделирования, но уменьшает его информативность.

Кнопка «Остановить моделирование» предназначена для постановки моделирования на паузу. Кнопка «Завершить моделирование» посылает сигнал `signalFinish`, который досрочно завершает моделирование, и выводит результаты, полученные на момент прерывания. Также в левой части программного обеспечения отображается текущее виртуальное время моделирования.

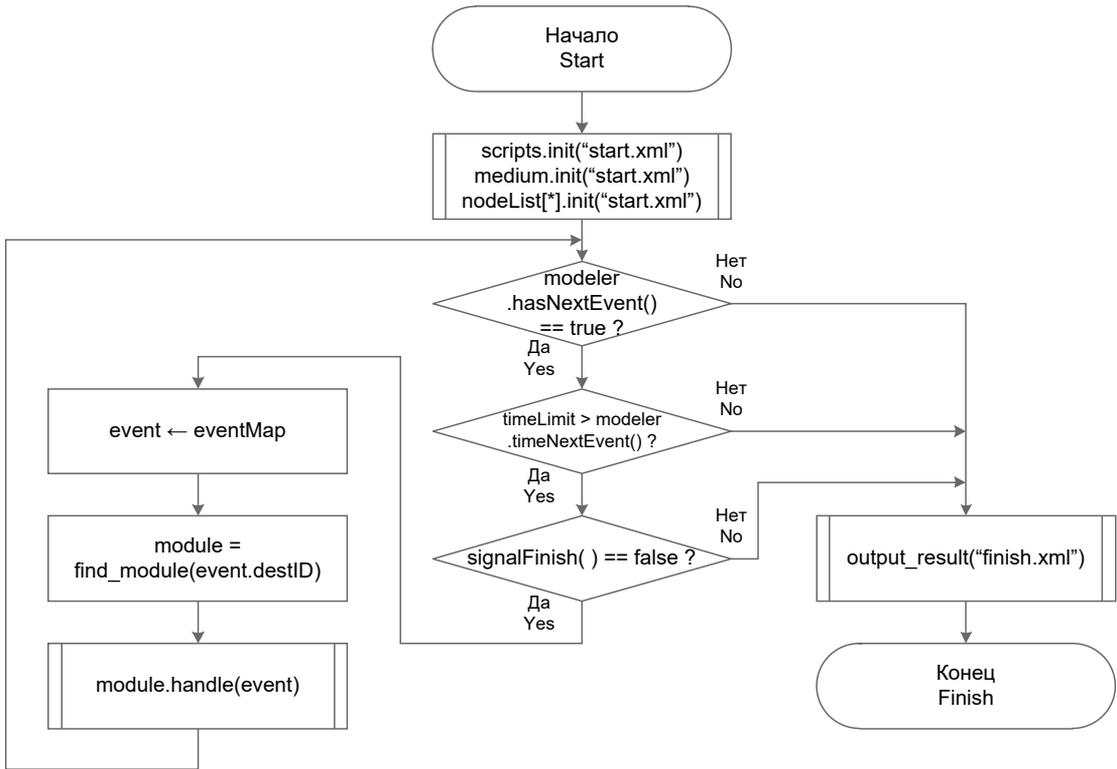


Рис. 4. Алгоритм дискретно-событийного моделирования

Fig. 4. Discrete-event modeling algorithm

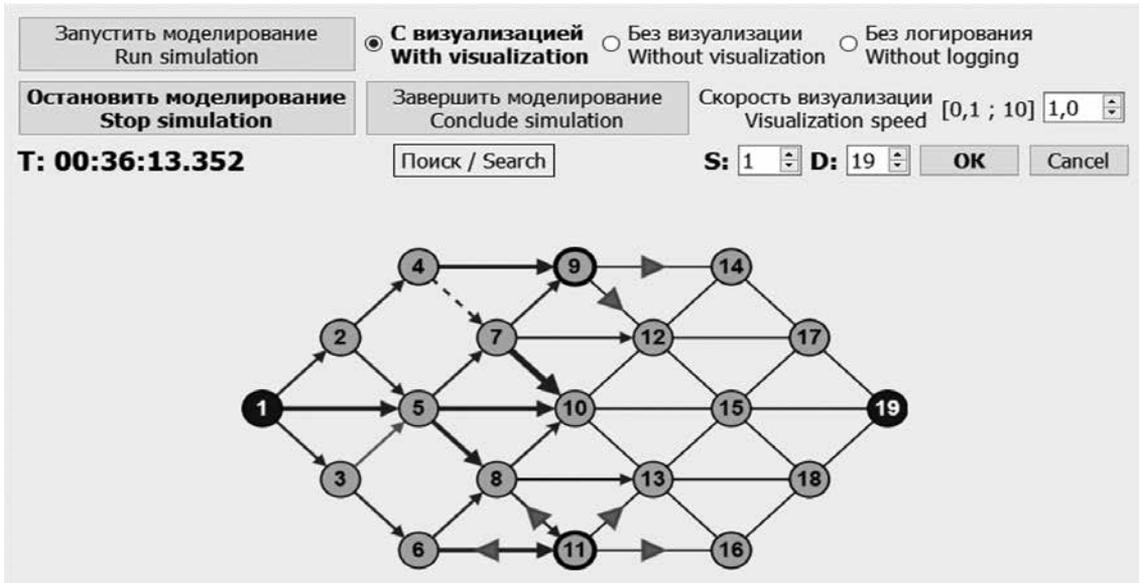


Рис. 5. Программное обеспечение для моделирования ad-ноcs сети в режиме «Поиск»

Fig. 5. Software of ad-hoc network simulating in "Search" mode

### Экспериментальное исследование протокола маршрутизации

Исследуем эффективность протокола маршрутизации при помощи разработанного программного обеспечения. В экспериментальном исследовании используем беспроводную ad-hoc сеть, топология которой представлена на рисунке 7. На графе сети обозначены показатели надежности каналов прямой связи между узлами, а также вероятность проходящего пакета с данными быть обработанным абонентом.

В нашем исследовании мы сравниваем временный и постоянный маршруты до

ставки данных по показателям надежности доставки данных (PDR, packet delivery ratio) и сквозной задержки передачи данных (E2ED, end-to-end delay). Скорость передачи данных между абонентами равна 10 килобайтам в секунду. Прикладной трафик составляет 2 килобайта в секунду. Средняя задержка при прохождении пакета с данными через узел – 4,78 секунды. На каждом узле генерировался аналогичный трафик, рассылаемый случайным соседям. Найденные в ходе экспериментального исследования постоянный и временный маршруты представлены на рисунке 6. Результаты экспериментального исследования – в таблице 1.

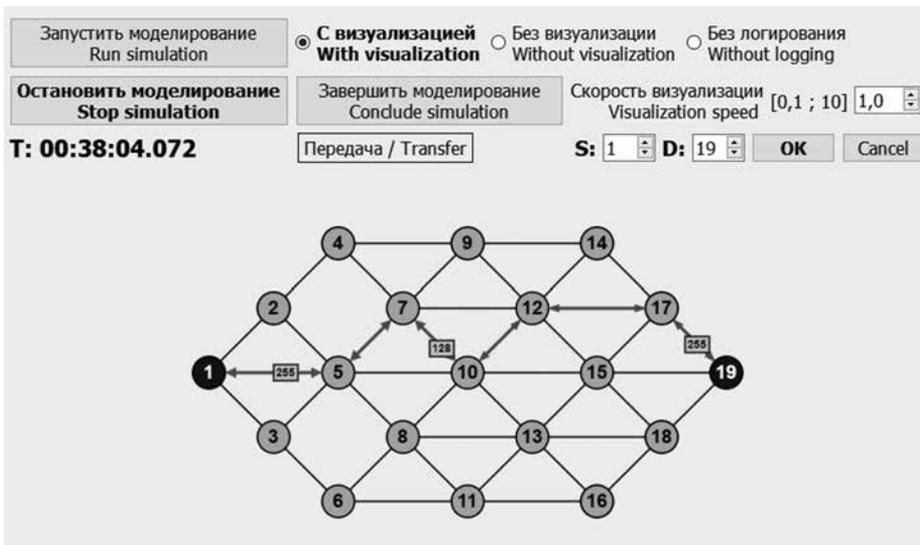


Рис. 6. Программное обеспечение для моделирования ad-hoc сети в режиме «Передача»

Fig. 6. Software of ad-hoc network simulating in "Transfer" mode

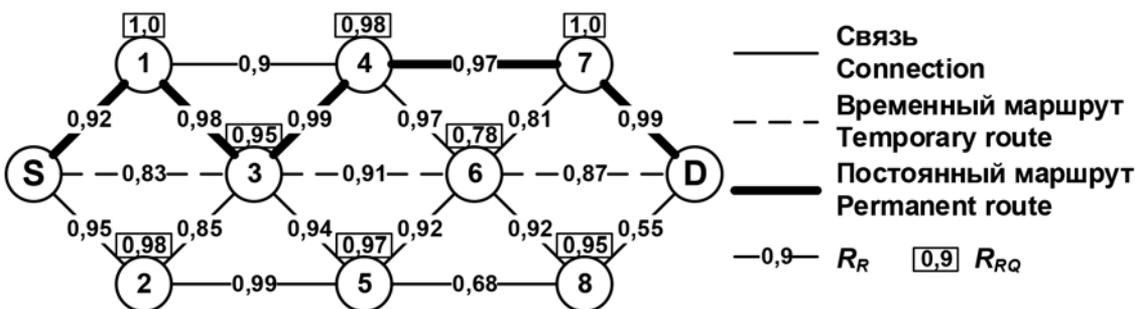


Рис. 7. Топология беспроводной ad-hoc сети

Fig. 7. Wireless ad-hoc network topology

**Таблица 1.** Результаты экспериментального исследования

**Table 1.** The experimental research results

Временный маршрут <i>Temporary route</i>		Постоянный маршрут <i>Permanent route</i>	
E2ED	PDR	E2ED	PDR
13,73 секунды	0,491	16,27 секунды	0,814
13.73 seconds	0.491	16.27 seconds	0.814

Результаты экспериментального исследования, полученные при помощи разработанной модели ad-нос сети, демонстрируют, что предложенный подход к маршрутизации трафика имеет преимущество по сравнению со стандартным подходом, при помощи которого определяется временный маршрут. По нему производится доставка данных до тех пор, пока не будет построен постоянный. Была повышена надежность доставки данных, при этом из-за увеличения длины маршрута повысилось время доставки данных.

**Заключение**

В процессе выполнения данной работы было реализовано программное обеспечение для моделирования функционирования беспроводной децентрализованной самоорганизующейся сети, протоколов и алгоритмов маршрутизации, при помощи которых производится ее организация. Симуляция работы

сети осуществляется при помощи дискретно-событийного моделирования.

Авторами была предложена структура модели, которая включает в себя модели сетевого узла, прикладного приложения, сетевого уровня, радиомодуля, среды радиопередачи, модули сценариев работы сети, сбора статистики и визуализации. Представлена схема классов, которые должны быть реализованы в процессе создания программного обеспечения. Разработанный симулятор позволяет осуществлять моделирование функционирования работы сети в нескольких режимах, включая режим визуализации выполнения функционирования сетевых алгоритмов, а именно построения маршрутов и передачи данных между выбранными абонентами.

Предложенный симулятор может быть использован для исследования, имитационного моделирования, отладки и оценки разрабатываемых алгоритмов и протоколов маршрутизации беспроводных ad-нос сетей в соответствии с заданными требованиями. Используя программное обеспечение, было проведено экспериментальное исследование, целью которого стало сравнение эффективности маршрутов передачи данных, построение которых осуществляется посредством предложенного разработанного авторами алгоритма маршрутизации. Результаты исследования продемонстрировали, что получаемый постоянный маршрут существенно надежнее временного, однако несколько уступает ему во времени передачи данных.

**Список литературы**

1. Жолобов А. Н., Прозоров Д. Е., Романов С. В. Симуляторы беспроводных MANET-сетей // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10. № 3. С. 28–33.
2. Новиков А. С., Пестин М. С. Программное обеспечение для настройки протоколов верхнего уровня ad-нос сетей // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 3 (87). С. 60–74. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-3-60-74.
3. Новиков А. С., Пестин М. С. Распределенная маршрутизация трафика в беспроводных децентрализованных самоорганизующихся сетях связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 149–154. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-149-154.
4. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.
5. Павлов А. А., Датьев И. О. Проблемы использования средств тестирования многошаговых беспроводных сетей // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8. № 3-8. С. 116–123.
6. Хохлов Н. И., Ивутин А. Н., Новиков А. С., Подчуфаров Ю. Б., Ларин Д. В., Пестин М. С. Протокол организации децентрализованной беспроводной сети связи для обеспечения взаимодействия группы интеллектуальных

- мобильных роботов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 12. С. 1081–1093. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1081-1093.
7. Хохлов Н. И., Ларин Д. В., Ларин А. В., Ивутин А. Н., Новиков А. С., Пестин М. С. Исследование протокола маршрутизации беспроводной децентрализованной самоорганизующейся сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 131–144.
  8. Шлеё М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 1072 с.
  9. Boukerchea A., Turgutb B., Aydin N., Ahmadd M. Z., Bölönid L., Turgutd D. Routing protocols in ad hoc networks: A survey // Computer Networks. 2011. Vol. 55. No. 13. P. 3032–3080. DOI: 10.1016/j.comnet.2011.05.010.
  10. Flood J. E. Telecommunications switching, traffic and networks. Chapter 4: Telecommunications traffic. – New York: Prentice-Hall, 1998. – 310 p.
  11. Mobile ad hoc networks: current status and future trends / ed. by J. Loo, J. L. Mauri, J. H. Ortiz. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. – 538 p.
  12. Novikov A. S., Ivutin A., Voloshko A., Pestin M. S. Method for optimizing ad-hoc networks communication protocol parameter values // Proceeding of the 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) (Budva, Montenegro, 2020). 2020. P. 595–598. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134154.
  13. Robinson S. Simulation: The practice of model development and use. – New York: Palgrave Macmillan, 2014. – 336 p.

### Сведения об авторах

Пестин Максим Сергеевич, ORCID 0000-0001-5503-9779, аспирант, кафедра вычислительной техники, Институт прикладной информатики и компьютерных наук, Тульский государственный университет, Тула, Россия, maxime1996rus@mail.ru

Новиков Александр Сергеевич, ORCID 0000-0003-3890-0912, канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники, Институт прикладной информатики и компьютерных наук, Тульский государственный университет, Тула, Россия, thesis-tsu@yandex.ru

### Поддержка исследований

Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Тульской области в сфере науки и техники (грант № ДС/286).

Статья поступила 17.03.2022, рассмотрена 06.04.2022, принята 20.06.2022

### References

1. Zholobov A. N., Prozorov D. E., Romanov S. V. Simulators of wireless MANET-networks. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2012, vol.10, no.3, pp.28-33 (in Russian).
2. Novikov A., Pestin M. Ad-hoc network top-level protocol configuration software. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2020, vol.15, no.3(87), pp.60-74 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-3-60-74.
3. Novikov A., Pestin M. Distributed traffic routing in wireless decentralized self-organized communication networks. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2021, no.5, pp.149-154 (in Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-149-154.
4. Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: Uchebnik dlya vuzov* [Computer networks. Principles, technologies, protocols: A textbook for universities]. St. Petersburg, Piter Publ., 4th edition, 2010, 944 p.
5. Pavlov A. A., Datyev I. O. Problems of using tools for testing multihop wireless networks. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, vol.8, no.3-8, pp.116-123 (in Russian).
6. Khokhlov N. I., Ivutin A. N., Novikov A. S., Podchufarov Yu. B., Larin D. V., Pestin M. S. A protocol for organizing a decentralized wireless communication network for ensuring the interaction of a group of intelligent mobile robots. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*=Journal of Instrument Engineering, 2020, vol.63, no.12, pp.1081-1093 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1081-1093.
7. Khokhlov N. I., Larin D. V., Larin A. V., Ivutin A. N., Novikov A. S., Pestin M. S. Research of routing protocol of a wireless decentralized self-organizing network. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*=Izvestiya Tula State University, 2019, no.6, pp.131-144 (in Russian).
8. Shlejo M. Qt 5.10. *Professional'noe programmirovaniye na C++* [Qt 5.10. Professional C ++ Programming]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2018, 1072 p.
9. Boukerchea A., Turgutb B., Aydin N., Ahmadd M. Z., Bölönid L., Turgutd D. A. Routing protocols in ad hoc networks: A survey. *Computer Networks*, 2011, vol.55, no.13, pp.3032-3080. DOI: 10.1016/j.comnet.2011.05.010.

10. Flood J. E. Telecommunications switching, traffic and networks. Chapter 4: Telecommunications traffic. New York, Prentice-Hall, 1998, 310 p.
11. Mobile ad hoc networks: current status and future trends. Ed. by J. Loo, J. L. Mauri, J. H. Ortiz. Boca Raton, FL, CRC Press, 2012, 538 p.
12. Novikov A. S., Ivutin A., Voloshko A., Pestin M. S. Method for optimizing ad-hoc networks communication protocol parameter values. Proceeding of the 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) (Budva, Montenegro, 2020), 2020, pp.595-598. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134154.
13. Robinson S. Simulation: The practice of model development and use. New York, Palgrave Macmillan, 2014, 336 p.

### About the authors

*Maxim S. Pestin*, ORCID 0000-0001-5503-9779, Postgraduate, Computer Engineering Department, Institute of Applied Mathematics and Computer Science, Tula State University, Tula, Russia, maxime1996rus@mail.ru  
*Alexander S. Novikov*, ORCID 0000-0003-3890-0912, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Computer Engineering Department, Institute of Applied Mathematics and Computer Science, Tula State University, Tula, Russia, thesis-tsu@yandex.ru

### Acknowledgments

The research was supported by Tula Region Government in the field of science and technology (project No. ДС/286).

Received 17.03.2022, reviewed 06.04.2022, accepted 20.06.2022

# Разработка архитектуры рекомендательной системы по выбору онлайн-курсов

Т. А. Шкодина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ростовский государственный экономический университет, Ростов-на-Дону, Россия  
\*seredkina.1994@yandex.ru

**Аннотация.** В статье дано обоснование актуальности разработки рекомендательной системы в сфере электронного обучения. Проанализированы основные подходы к построению рекомендательной системы: коллаборативная, контентная и гибридная фильтрации. В алгоритмическом обеспечении рассмотрены методики создания рекомендательных систем, такие как машинное обучение, нейронные сети, генетические алгоритмы. Представлены основные объекты рекомендательной системы по выбору онлайн-курсов: обучающийся, учебные модули (онлайн-курсы), элементы знаний, которые может получить пользователь по окончании обучения. Выявлены проблемы в методах построения рекомендательных систем: разреженность; холодный запуск; масштабируемость; поиск элементов, которые с наибольшей вероятностью будут предпочтительнее для пользователя из общего набора элементов. Основная проблема рекомендательных систем состоит в получении точной и качественной рекомендации выбора учебных объектов в соответствии с предпочтениями пользователей. Сделан вывод о необходимости построения архитектуры рекомендательной системы, включающей модель индивидуальной траектории обучения. Фильтрация учебных объектов происходит с помощью генетического алгоритма. Определена целесообразность использования микросервисного подхода для создания веб-приложения. Выделены функциональные задачи разрабатываемой системы, такие как сбор данных, анализ запросов пользователя, формирование учебных объектов с применением индивидуальной траектории обучения и выдача рекомендаций по выбору онлайн-курсов. Разработаны алгоритм функционирования рекомендательной системы, схема работы рекомендательной системы, а также информационное обеспечение работы данной системы. Предложен общий подход к разработке универсального рекомендательного сервиса, который может встраиваться в сервис клиента. Цель разработки рекомендательной системы по выбору онлайн-курсов заключается в предоставлении обучающимся наиболее подходящих учебных объектов (последовательность объектов) для изучения в соответствии с характеристиками обучающегося и фрагментами знаний (компетенций).

**Ключевые слова:** рекомендательная система, электронное обучение, архитектура рекомендательной системы, микросервисный подход, онлайн-курс

**Для цитирования:** Шкодина Т. А. Разработка архитектуры рекомендательной системы по выбору онлайн-курсов // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 87–96. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-87-96

# Development of the architecture of a recommendation system for choosing online courses

T. Shkodina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russia

\* *seredkina.1994@yandex.ru*

**Abstract.** The article provides a rationale for the relevance of developing a recommender system in the field of e-learning. The main approaches to building a recommender system are analyzed: collaborative, content and hybrid filtering. The main objects of the recommender system for choosing online courses are presented: the student, training modules (online courses), elements of knowledge that the user can receive at the end of the training. In algorithmic support, methods for creating recommender systems, such as machine learning, neural networks, genetic algorithms, are considered. Problems in the methods of building recommender systems have been identified: sparseness; cold start; scalability; searching for elements that are most likely to be preferred by the user from a common set of elements. The main problem of recommender systems is to obtain an accurate and high-quality recommendation for the selection of educational objects in accordance with user preferences. It is concluded that it is necessary to build an architecture of a recommender system, including a model of an individual learning trajectory. Filtration of educational objects occurs with the help of a genetic algorithm. The expediency of using a microservice approach to create a web application is determined. The functional tasks of the developed system are highlighted, such as data collection, analysis of user requests, the formation of educational objects using an individual learning trajectory and the issuance of recommendations for choosing online courses. An algorithm for the functioning of the recommender system, a scheme for the operation of the recommender system, as well as information support for the operation of this system have been developed. A general approach to the development of a universal recommender system that can be integrated into the client's service is proposed. The purpose of developing a recommender system for choosing online courses is to provide students with the most appropriate learning objects (sequence of objects) to study in accordance with the characteristics of the student and fragments of knowledge (competencies).

**Keywords:** recommender system, e-learning, recommender system architecture, microservice approach, online course

**For citation:** Shkodina T. Development of the architecture of a recommendation system for choosing online courses. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.87-96 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-87-96

## Введение

В последние годы интерес к рекомендательным системам значительно вырос, что позволило использовать их в различных областях [1]. Современные рекомендательные системы предоставляют ре-

комендации, используя различные данные о пользователях, объектах и операциях пользователей над объектами. Все эти действия сохраняются в базе данных рекомендательной системы и могут быть использованы для новых рекомендаций. Информация, которую собирают рекомендательные системы, может

быть задана явно – сбор оценок пользователей или неявно – путем отслеживания поведения пользователя.

Рекомендательная система – это интеллектуальная система, выдающая активным пользователям предложения о цифровых товарах, которые могут им понравиться [2]. Сервис рекомендаций для выбора онлайн-курсов должен иметь в основе модель рекомендательной системы, а также дополнительные модули поддержки.

Большое количество исследовательских работ сосредоточено на исследованиях рекомендаций на тему электронного обучения [3, 4]. Наиболее часто используемые подходы к построению рекомендательной системы – коллаборативная (CF), контентная (content-base, CBF) и гибридная фильтрация. Коллаборативная фильтрация основана на матрице полезности контента или товара для пользователей. Контентная фильтрация сравнивает содержание документов с контентом, который интересует пользователя, чтобы сгенерировать рекомендацию [5]. Эволюция рекомендательных систем показала важность гибридной фильтрации, о чем свидетельствует обзор литературы, представленный в [6].

В алгоритмическом обеспечении рекомендательных систем используются следующие методики: машинное обучение [7], нейронные сети, генетические алгоритмы [8], нечеткие модели [9].

Как и любая другая система, все методы рекомендательной системы сталкиваются с трудностями получения точной и качественной рекомендации. Проблема разреженности увеличивает вычислительное время, необходимое для прогнозирования. Следующей проблемой является холодный запуск. Трудность состоит в сложности рекомендации новых услуг новым пользователям. Именно недостаток знаний о пользователе или предоставляемой услуге приводит к некачественной выдаче рекомендации. Масштабируемость системы отражает сте-

пень поглощения растущего объема информации рекомендательной системы. Например, коллаборативная фильтрация сталкивается с данной проблемой с миллионами пользователей и миллионами отдельных элементов каталога [10]. Также проблема любой рекомендации состоит в поиске элементов, которые с наибольшей вероятностью будут предпочтительнее для пользователя из общего набора элементов.

Салехи [11] предложил рекомендательный подход, основанный на скрытых характеристиках, который улучшает качество рекомендаций и решает проблему разреженности. Он использовал генетический алгоритм в качестве контролируемой учебной задачи для оптимизации веса скрытых функций для каждого учащегося на основе исторического рейтинга. Гибридная фильтрация рекомендательной системы для учебных материалов разработана Салехи и др. [12].

Анализ исследовательских работ указывает на актуальность разработки универсального рекомендательного сервиса по выбору онлайн-курсов с учетом предпочтений пользователя.

## Общий подход к разработке рекомендательной системы

При проектировании архитектуры рекомендательной системы, взаимодействующей с сервисом и пользователями, был выбран современный микросервисный подход. Основное преимущество данного подхода – разработка программных приложений как набора автономных небольших сервисов. Микросервисная архитектура позволяет получить независимые фрагменты приложения, что влечет за собой повышение стабильности приложения в целом. Короткий и независимый релизный цикл позволяет быстро доставлять изменения до пользователей. Данное архитектурное решение является наиболее подходящим. Для поддержки платформ и устройств различных

типов необходимы такие функции, как гибкость, масштабируемость, отказоустойчивость. Такими архитектурными решениями обладает микросервисный подход. Изменение модели данных в одном сервисе не влияет на работу остальных, так как каждый микросервис использует собственное хранилище данных. В данной архитектуре отсутствуют неявные межмодульные взаимосвязи, потому что определение сервиса, в котором произошла ошибка, становится тривиальной задачей, а ее устранение в виду простоты кода занимает меньше времени в сравнении с монолитной архитектурой [13].

Схема приложения, работающего по принципам микросервисной архитектуры, представлена на рисунке 1. В рассматриваемой архитектуре клиент-сервера запрос со стороны клиента сначала попадает на сервер статистики. Сервер статистики предназначен для повышения скорости загрузки веб-приложения. Затем запрос перенаправляется на основной сервер (узел). Основной сервер рассылает подзапросы по микросервисам, которые возвращают определенные данные. После об-

работки подзапросов и отправки ответа основному серверу собранные данные отправляются клиенту.

Общая схема работы рекомендательной системы, использующая модель индивидуальной траектории обучения предлагаемого подхода, представлена на рисунке 2. Предлагается рекомендательная система по выбору онлайн-курсов, настроенная на выдачу рекомендаций по предпочтениям пользователей, через создание модели индивидуальной траектории обучения на основе входных данных пользователя (студента), полученных от главного сервера. В качестве входных данных выступают характеристики профиля студента.

## Архитектура рекомендательной системы

Основными объектами в данной рекомендательной системе по выбору онлайн-курсов являются пользователь (студент), учебные объекты, элементы знаний и взаимодействие между ними с учетом общих требований к ос-

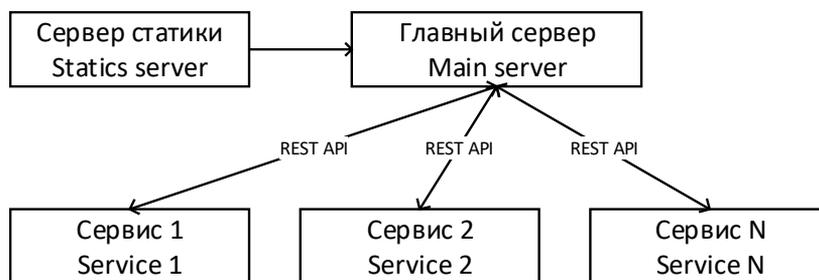


Рис 1. Схема микросервисной архитектуры

Fig. 1. Diagram of microservice architecture

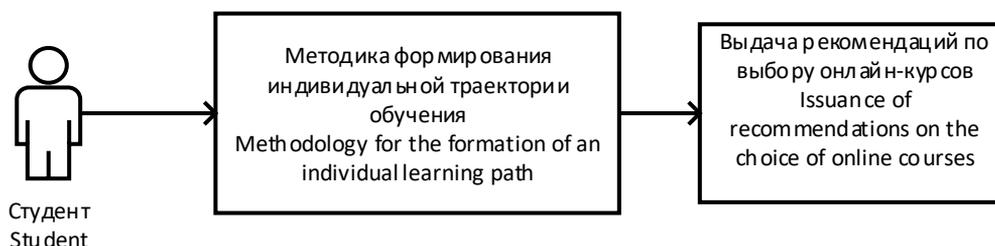


Рис 2. Схема работы рекомендательной системы

Fig. 2. Diagram of the recommendation system

воению учебной программы и согласно учебному плану.

Функциональные задачи разрабатываемой системы:

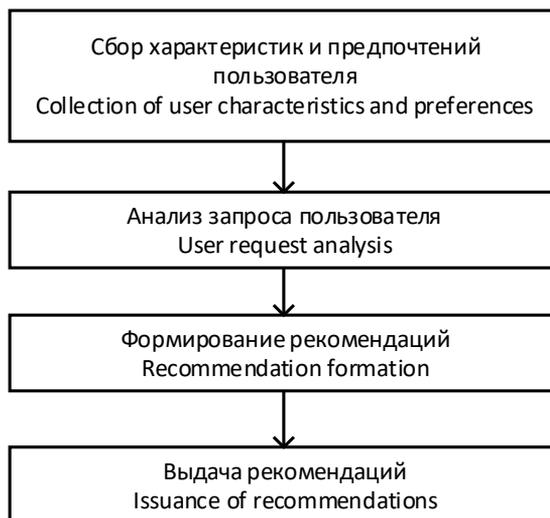
1. Сбор данных. На данном этапе происходит получение данных из источников и наполнение моделей пользователей и объектов (курсы, учебные модули, элементы знания).

2. Анализ запроса пользователя. Сбор и систематизация запросов пользователя с заданными им параметрами.

3. Фильтрация учебных объектов с применением адаптивной модели индивидуальной траектории обучения, разработанной для рекомендательной системы. Цель оптимальной траектории обучения заключается в том, чтобы предоставить обучающимся наиболее подходящий учебный объект (последовательность объектов) для изучения в соответствии с характеристиками обучающегося [14]. На данном этапе происходит наполнение моделей оценок (компетенций). Фильтрация учебных объектов происходит с помощью генетического алгоритма. Генетический алгоритм используется для того, чтобы найти оптимальную метрику подобия. Данный алгоритм включает функцию подобия, которое обеспечивает лучшее качество и быстрые результаты по сравнению с традиционными методами.

4. Выдача рекомендаций. Преобразования списка рекомендаций, полученных на предыдущем этапе, в формат, который будет передан модулю системы, ответственной за пользовательский интерфейс.

На протяжении функционирования системы происходит сбор данных элементов знаний пользователя, что позволяет системе адаптироваться под предпочтения пользователя. В функциональной архитектуре предполагается, что пользователь самостоятельно будет оценивать рекомендации, выданные ему системой. Извлечение знания обучающегося и знания об учебных курсах является основной задачей системы рекомендаций [15]. Алгоритм функционирования рекомендательной системы изображен на рисунке 3.



**Рис. 3.** Алгоритм функционирования рекомендательной системы

**Fig. 3.** Algorithm for the functioning of the recommender system

В качестве входных данных система получает информацию об интересах пользователя, таких как область знания и навыки, которые хочет приобрести пользователь и которые хранятся в его профиле. Чтобы отслеживать изменения в предпочтениях пользователя, необходим регулярный парсинг веб-страницы. Данные предполагается получать и использовать на веб-проектах. С помощью фреймворка Vue.js с использованием протокола HTTP был реализован основной внешний интерфейс, по которому json-файлы передают входные данные пользователя и запросы рекомендаций для него. Данные запросы могут быть совершены с помощью HTTP-библиотеки Requests из Python-кода, размещаемого на страницах рекомендательной системы. Данный подход позволяет использовать рекомендательную систему в новом проекте без установки счетчика. Информационное обеспечение работы рекомендательного модуля представлено на рисунке 4.

Информация о действии пользователя попадает в хранилище log-файлов, а далее – в модуль онтология, которая включает в себя профиль пользователя с предпочтениями

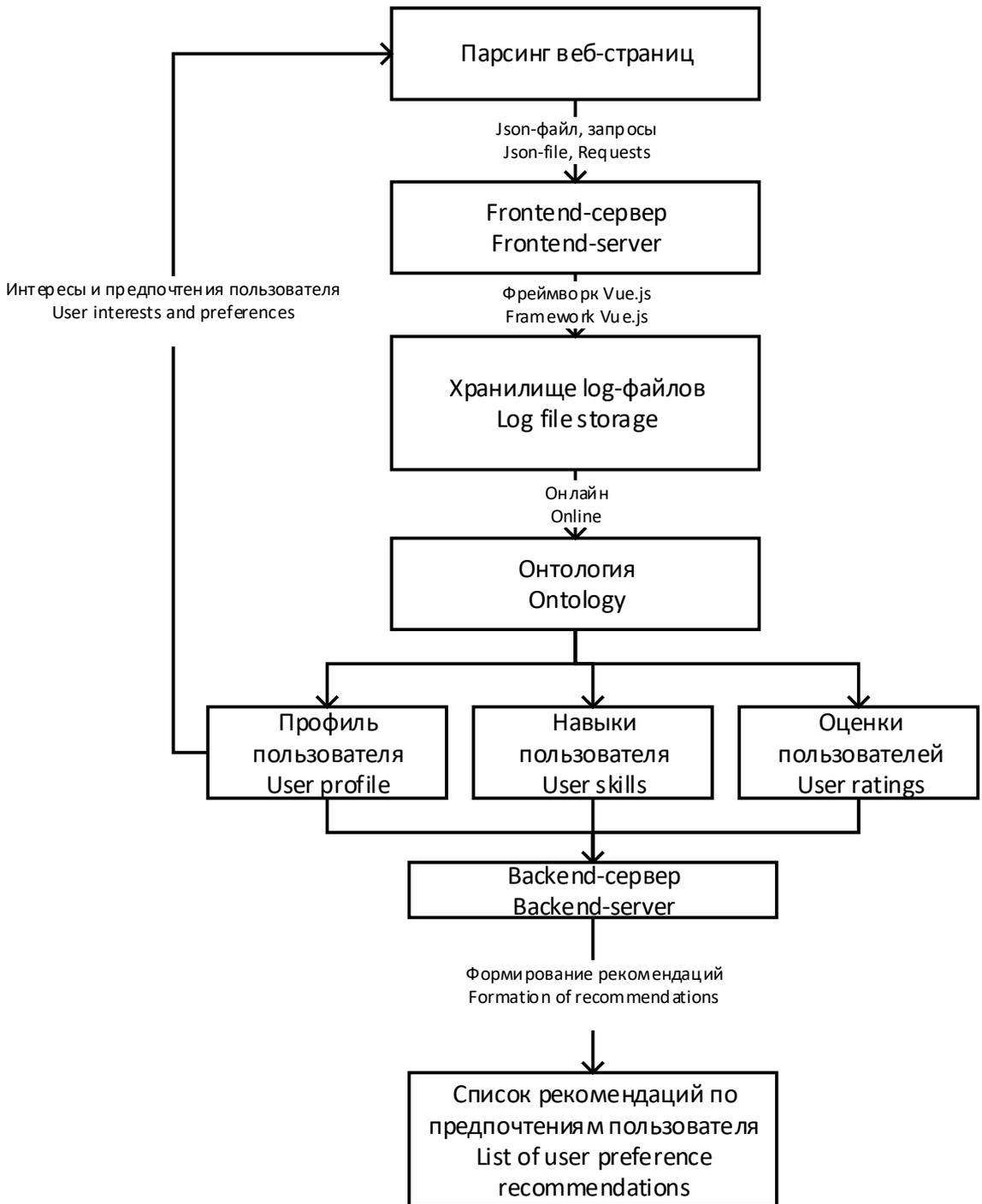


Рис. 4. Информационное обеспечение работы рекомендательного модуля

Fig. 4. Information support for the work of the recommender module

и интересами обучающегося, элементы знаний и оценки студентов – выборку последовательности учебных объектов с наибольшими суммарными оценками, которые соответствуют элементам знаний (компетенциям) и общим требованиям к освоению учебной программы.

Для формирования рекомендаций при запросе пользователя происходит перебор всех объектов, отфильтрованных определенным образом, т. е. с помощью модели построения индивидуальной траектории обучения происходит выбор одного или нескольких подходящих онлайн-курсов в соответствии с учебным планом.

В разрабатываемой рекомендательной системе выделены следующие бизнес-задачи, которые реализованы как отдельные микросервисы: сбор данных, формирование оценок (компетенций) учебных объектов и выдача рекомендаций. Каждый из сервисов имеет собственное хранилище данных. Общение с другими сервисами происходит через API-интерфейсы. Также программный комплекс будет включать в себя базу знаний (сервер учебных объектов, элементов знаний).

В качестве управляющего узла для хранения и обработки данных используется интегрированная среда разработки Pycharm и высокоуровневый фреймворк Django. Данный фреймворк реализует архитектуру Model-View-Template (MVT). Данная архитектура облегчает управление сложными структурами с помощью разделения приложения на такие части, как модель, представление и шаблоны. В качестве базы данных используется SQLite 3. Эта база данных поддерживает непрерывную интеграцию с фреймом данных Pandas, который необходим для анализа индивидуальных траекторий студентов. Pandas – это встроенная библиотека Python для обработки и анализа данных.

Для реализации построения индивидуальной траектории обучения с помощью генетического алгоритма используется система новой эволюционной вычислительной среды

DEAP (Distributed Evolutionary Algorithm in Python), которая включает в себя структуры данных и инструменты, необходимые для реализации методов эволюционных вычислений.

Первичная задача сервера сбора данных – получить исходные данные от пользователя. После отправки данных пользователя на сервер сбора данных эти данные попадают на сервер Stateless с помощью технологии REST API. Данная технология позволяет получать и модифицировать данные и состояния удаленных приложений, передавая HTTP-вызовы через интернет. При сборе данных и выдачи рекомендаций происходит обмен данными между сервером и клиентом. Stateless-сервер позволяет распределить данные на узлы формирования оценки фрагментов знаний (компетенций). С помощью обученной модели индивидуальной траектории обучения происходит формирование оценки для дальнейшей отправки информации на сервер базы данных. Сервис формирования рекомендаций состоит из трех компонентов: главный сервер, управляющий узел Pycharm и выдача рекомендаций.

Таким образом, система работает с СУБД SQLite3 для сбора данных и системой логических рассуждений Fuxi на основе Python выдачи рекомендаций. Система Fuxi написана на языке Python с целью создания семантической сети с открытым исходным кодом. Также Fuxi работает с внешними редакторами онтологий, например Protege. Он может сохранять данные в owl- или xml-формате, что позволяет использовать код xml, преобразованный с помощью скрипта в Python. База данных SQLite3 позволяет увеличить скорость записи данных без использования транзакций. Также с помощью встраиваемой библиотеки joblib легко масштабируется в зависимости от нужд микросервисов. На рисунке 5 представлена архитектура рекомендательной системы по выбору онлайн-курсов.

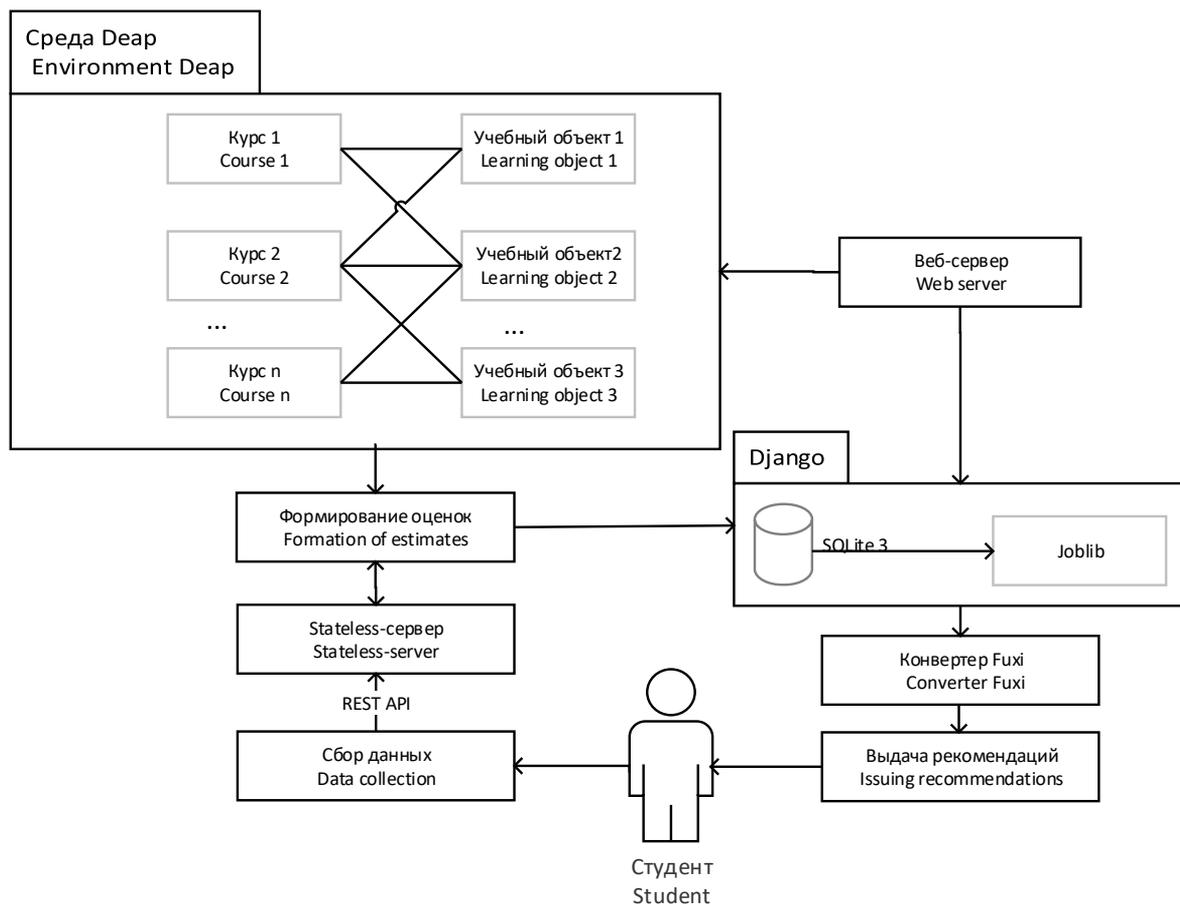


Рис. 5. Архитектура рекомендательной системы

Fig. 5. Recommender architecture

## Заключение

В данной статье проведен анализ подходов к построению рекомендательной системы. На основе данного анализа был предложен подход, основанный на модели индивидуальной траектории обучения с учетом предпочтений пользователей и элементов знаний (компетенций), представляемых суммарной оценкой в системе для дальнейшей выдачи рекомендаций. Данный подход может быть использован для разработки рекомендательных систем по выбору подходящих учебных объектов или последовательности учебных объектов с использованием индивидуальной траектории обучения. На основе предложен-

ного подхода разработаны функциональная архитектура модулей и архитектура рекомендательной системы в целом, которая включает в себя все этапы построения рекомендательного сервиса: сбор данных, обработка и хранение данных, фильтрация учебных объектов и выдача рекомендаций. Для создания архитектуры рекомендательной системы был использован микросервисный подход. Архитектура микросервисного подхода использует библиотеки и деление приложения на микросервисы. Использование микросервисного подхода обеспечивает быструю доставку изменений пользователю, а также повышает стабильность работы приложения в целом.

## Список литературы

1. Park D. H., Kim H. K., Choi I. Y., Kim J. K. A literature review and classification of recommender systems research // *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39. No. 11. P. 10059–10072. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.02.038.
2. Sharma L., Gera A. A survey of recommendation system: Research challenges // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2013. Vol. 4. No. 5. P. 1989–1992.
3. Zaiane O. Building a recommender agent for e-learning systems // *Proceedings of the International Conference on Computers Education (ICCE'02)*. 2002. Vol. 1. P. 55–59. DOI: 10.1109/CIE.2002.1185862.
4. Abbar S., Bouzeghoub M., Lopez S. Context-aware recommender systems: A service oriented approach // *Proceedings of the 3rd International Workshop on Personalized Access, Profile Management and Context Awareness in Databases*. 2009. P. 1–6.
5. Herlocker J., Konstan J., Borchers A., Riedl J. An algorithmic framework for performing collaborative filtering // *Proceedings of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. 1999. P. 230–237. DOI: 10.1145/312624.312682.
6. Burke R. Hybrid recommender systems: survey and experiments // *User Modeling and User-Adapted Interaction*. 2002. Vol. 12. No. 4. P. 331–370. DOI: 10.1023/A:1021240730564.
7. Таратухина Ю., Барт Т., Власов В. Машинное обучение модели информационной рекомендательной системы по вопросам индивидуализации образования // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2019. № 2 (27). С. 7–14. DOI: 10.21777/2500-2112-2019-2-7-14.
8. Солодовников В. И. Использование генетических алгоритмов в задачах анализа данных и построения систем правил // *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2013. № 16. С. 72–77.
9. Razak T. R., Hashim M. A., Noor N. M., Halim I. H. A., Shamsul N. F. Path recommendation system for UiTM Perlis students using fuzzy logic // *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*. 2014. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIAS.2014.6869553.
10. Su X., Khoshgoftaar T. A survey of collaborative filtering techniques // *Journal of Advances in Artificial Intelligence*. 2009. Article 421425. P. 1–19. DOI: 10.1155/2009/421425.
11. Salehi M. Latent feature based recommender system for learning materials using genetic algorithm // *Journal of Information Systems and Telecommunication*. 2014. Vol. 2. No. 3. P. 137–144. DOI: 10.7508/jist.2014.03.001.
12. Salehi M., Pourzaferani M., Razavi S. Hybrid attribute-based recommender system for learning material using genetic algorithm and a multidimensional information model // *Egyptian Informatics Journal*. 2013. Vol. 14. No. 1. P. 67–78. DOI: 10.1016/j.eij.2012.12.001.
13. Ньюмен С. Создание микросервисов. – СПб.: Питер, 2016. – 304 с.
14. Шполянская И. Ю., Середкина Т. А. Технология Semantic Web в организации поддержки онлайн обучения // *Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXIV Международной научной и учебно-практической конференции: в 3 ч. / под общ. ред. Г. В. Гореловой, А. В. Логиновой*. – СПб., 2020. С. 343–350. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-231.
15. Shishehchi S., Banihashem S. Y., Zin N. A. A proposed semantic recommendation system for e-learning: A rule and ontology-based e-learning recommendation system // *Proceedings of the International Symposium on Information Technology (ITSim)*. 2010. Vol. 1. P. 1–5. DOI: 10.1109/ITSIM.2010.5561329.

## Сведения об авторе

Шкодина Татьяна Андреевна, ORCID 0000-0003-1754-3629, старший преподаватель, кафедра информационных систем и прикладной информатики, Ростовский государственный экономический университет, Ростов-на-Дону, Россия, seredkina.1994@yandex.ru

Статья поступила 25.02.2022, рассмотрена 22.03.2022, принята 20.06.2022

## References

1. Park D. H., Kim H. K., Choi I. Y., Kim J. K. A literature review and classification of recommender systems research. *Expert Systems with Applications*, 2012, vol.39, no.11, pp.10059-10072. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.02.038.
2. Sharma L., Gera A. A survey of recommendation system: Research challenges. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2013, vol.4, no.5, pp.1989-1992.

3. Zaiane O. Building a recommender agent for e-learning systems. Proceedings of the International Conference on Computers Education (ICCE'02), 2002, vol.1, pp.55-59. DOI: 10.1109/CIE.2002.1185862.
4. Abbar S., Bouzeghoub M., Lopez S. Context-aware recommender systems: A service oriented approach. Proceedings of the 3rd International Workshop on Personalized Access, Profile Management and Context Awareness in Databases, 2009, pp.1-6.
5. Herlocker J., Konstan J., Borchers A., Riedl J. An algorithmic framework for performing collaborative filtering. Proceedings of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, 1999, pp.230-237. DOI: 10.1145/312624.312682.
6. Burke R. Hybrid recommender systems: survey and experiments. User Modeling and User-Adapted Interaction, 2002, vol.12, no.4, pp.331-370. DOI: 10.1023/A:1021240730564.
7. Taratukhina Yu., Bart T., Vlasov V. Machine learning models of information recommendation system on individualization of education. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii*=Educational Resources and Technologie, 2019, no.2(27), pp.7-14 (in Russian). DOI: 10.21777/2500-2112-2019-2-7-14.
8. Solodovnikov V. I. *Ispol'zovanie geneticheskikh algoritmov v zadachakh analiza dannykh i postroeniya sistem pravil* [The use of genetic algorithms in the problems of data analysis and building systems of rules]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh*, 2013, no.16, pp.72-77.
9. Razak T. R., Hashim M. A., Noor N. M., Halim I. H. A., Shamsul N. F. Path recommendation system for UiTM Perlis students using fuzzy logic. Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2014, pp.1-5. DOI: 10.1109/ICIAS.2014.6869553.
10. Su X., Khoshgoftaar T. A survey of collaborative filtering techniques. Journal of Advances in Artificial Intelligence, 2009, article 421425, pp.1-19. DOI: 10.1155/2009/421425.
11. Salehi M. Latent feature based recommender system for learning materials using genetic algorithm. Journal of Information Systems and Telecommunication, 2014, vol.2, no.3, pp.137-144. DOI: 10.7508/jist.2014.03.001.
12. Salehi M., Pourzaferani M., Razavi S. Hybrid attribute-based recommender system for learning material using genetic algorithm and a multidimensional information model. Egyptian Informatics Journal, 2013, vol.14, no.1, pp.67-78. DOI: 10.1016/j.eij.2012.12.001.
13. Newman S. *Sozdanie mikroservisov* [Creating microservices]. Saint Petersburg, *Piter Publ.*, 2016, 304 p.
14. Shpolyanskaya I. Yu., Seredkina T. A. Semantic web technologies for the support of online learning. *Sistemnyi analiz v proektirovanii i upravlenii sbornik nauchnykh trudov XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi i uchebno-prakticheskoi konferentsii: v 3 ch.* [System analysis in design and management: collection of scientific papers of the XXIV International scientific and educational-practical conference: at 3 parts]. Total ed. by G. V. Gorelovoi, A. V. Loginovoi. Saint Petersburg, 2020, pp.343-350 (in Russian). DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-231.
15. Shishehchi S., Banihashem S. Y., Zin N. A. A proposed semantic recommendation system for e-learning: A rule and ontology-based e-learning recommendation system. Proceedings of the International Symposium on Information Technology (ITSim), 2010, vol.1, pp.1-5. DOI: 10.1109/ITSIM.2010.5561329.

### About the author

Tatiana A. Shkodina, ORCID 0000-0003-1754-3629, Senior Lecturer, Information Systems and Applied Informatics Department, Rostov State University of Economics (RGEU), Rostov-on-Don, Russia, seredkina.1994@yandex.ru

Received 25.02.2022, reviewed 22.03.2022, accepted 20.06.2022

# Прогнозирование и минимаксное оценивание состояний производственной системы при наличии рисков

А. Ф. Шориков<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\* [afshorikov@mail.ru](mailto:afshorikov@mail.ru)

**Аннотация.** Решение задачи прогнозирования состояния сложных социально-экономических систем возможно только на основе соответствующих динамических экономико-математических моделей, описывающих их основные параметры, наличие управляющих воздействий и рисков (неопределенных возмущений, погрешностей моделирования и т. п.). В данной работе предлагается использовать детерминированный минимаксный подход для моделирования и решения задачи оценивания прогнозируемых состояний производственной системы при наличии рисков. Для принятия управленческих решений на производственном предприятии, направленных на повышение эффективности его функционирования, необходимо иметь качественное информационное обеспечение, основу которого составляет решение соответствующей задачи прогнозирования состояний его базовых параметров. В данной статье для описания функционирования производственной системы предлагается использовать дискретную управляемую динамическую систему при наличии рисков. Предполагается, что значения управляющего воздействия (допустимых сценариев управления) реализуются из конечного множества допустимых элементов соответствующего конечномерного векторного пространства, а реализации значений фазового вектора модели и вектора рисков ограничены заданными многогранниками-компактами в соответствующих конечномерных векторных пространствах. Применение разработанной дискретной управляемой динамической модели, описывающей выпуск продукции предприятия при наличии рисков, и разработанной методики формирования и минимаксного оценивания прогнозного множества ее фазовых состояний в заданный период времени позволяют разрабатывать соответствующие численные алгоритмы, которые могут использоваться при разработке и создании компьютерных интеллектуальных информационных систем, обеспечивающих поддержку принятия эффективных управленческих решений на производственных предприятиях. Основными результатами данной работы являются разработка новой экономико-математической модели, описывающей динамику выпуска продукции предприятия при наличии рисков, и создание на ее основе методики для построения и минимаксного оценивания прогнозного множества ее фазовых состояний.

**Ключевые слова:** производственная система, выпуск продукции, экономико-математическая модель, прогнозное множество, минимаксное оценивание, наличие рисков, информационное обеспечение

**Для цитирования:** Шориков А. Ф. Прогнозирование и минимаксное оценивание состояний производственной системы при наличии рисков // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 97–112. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-97-112

# Prediction and minimax estimation of the production system in the presence of risks

A. Shorikov<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

\* afshorikov@mail.ru

**Abstract.** The solution of the problem of forecasting the state of complex socio-economic systems is possible only on the basis of appropriate dynamic economic and mathematical models that describe their main parameters, the presence of control actions and risks. In this paper, it is proposed to use a deterministic minimax approach for modeling and solving the problem of estimating the predicted states of a production system in the presence of risks. To make managerial decisions at a manufacturing enterprise aimed at improving the efficiency of its functioning, it is necessary to have high-quality information support, the basis of which is the solution of the corresponding problem of predicting the states of its basic parameters. In this article, to describe the functioning of a production system, it is proposed to use a discrete-time controlled dynamical system in the presence of risks. It is assumed that the values of the control action (admissible control scenarios) are realized from a finite set of admissible elements of the corresponding finite-dimensional vector space, and the realizations of the values of the phase vector of the model and the risk vector are limited by the given compact polyhedrons in the corresponding finite-dimensional vector spaces. Application of the developed discrete-time controlled dynamical model that describes the output products of an enterprise in the presence of risks, and the developed methodology for the formation and minimax estimation of the predictive set of its phase states in a given period of time, allow us to develop appropriate numerical algorithms that can be used in the development and creation of computer intelligent information systems that provide support for making effective management decisions at manufacturing enterprises. The main results of this work is the development of a new economic-mathematical model that describes the dynamics of the output products of an enterprise in the presence of risks and the creation on its basis of a methodology for constructing and minimax estimation of the predictive set of its phase states in the form of implementing a finite number of one-step operations that allow their algorithmization. The results obtained in this work can serve as a basis for developing methods for optimizing the management of enterprise production processes and creating computer intelligent information systems to support managerial decision-making.

**Keywords:** production system, output, economic and mathematical model, predictive set, minimax estimation, risks, information support

**For citation:** Shorikov A. Prediction and minimax estimation of the production system in the presence of risks. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.97-112 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-97-112

## Введение

Роль проблем прогнозирования функционирования и развития производственных предприятий в современных экономических условиях России значительно возрастает в связи с усложнением производственных связей, нестабильности экономических условий, наличия инфляционных

процессов, а также необходимости разработки интеллектуальных компьютерных систем для автоматизации процессов принятия управленческих решений. Прогнозирование состояния производственных систем, в первую очередь, необходимо для информационного обеспечения всех звеньев соответствующих систем управления. От качества прогнозов зависит эффективность принимаемых

решений на предприятии и, следовательно, уровень его конкурентоспособности.

Для успешного решения задачи прогнозирования состояния производственной системы необходимо использование соответствующей экономико-математической модели, описывающей ее базовые параметры, управляющие переменные и риски (априори неопределенные возмущения, погрешности моделирования и др.), а также имеющиеся технико-экономические условия и ограничения (см., например, работы [1–6]). На основе таких моделей разрабатываются методы и алгоритмы решения необходимых задач прогнозирования, которые реализуются в виде информационных систем для обеспечения поддержки принятия управленческих решений. Такие системы позволяют принимать оперативные и качественные решения в реальном времени реализации производственного процесса. На их основе разработаны комплексные автоматизированные системы управления функционированием предприятия – корпоративные информационные системы, такие как SAP Business Suite, Oracle E-Business Suite, 1С: Предприятие, Microsoft Dynamics NAV, Галактика Business Suite и др. [7]. Чтобы успешно функционировать в сложных экономических условиях, производственные предприятия широко используют такие корпоративные системы и реализуют их сопряжение с системами управления производственными процессами.

Применение компьютерных средств поддержки принятия управленческих решений позволяет также решать и задачи планирования производства, а на их основе осуществлять оптимизацию выпуска продукции за счет минимизации издержек.

В практической деятельности любого предприятия важное место занимает решение задач прогнозирования состояния его основных параметров и результатов деятельности. От качества решений этих задач зависят выбор стратегии развития предприятия и так-

тики хозяйственной деятельности, а также его конкурентоспособность.

Необходимо отметить, что такие задачи являются сложными даже для небольшого предприятия и требуют использования специализированных компьютерных информационных систем. В этих системах имеются блоки решения задач прогнозирования, которые реализуют алгоритмы, базирующиеся на соответствующих экономико-математических моделях.

Существует два основных класса используемых при прогнозировании моделей – статические и динамические, в рамках которых реализуются стохастические и детерминированные формализации исследуемых задач прогнозирования [1–6].

Динамические экономико-математические модели позволяют учитывать изменение базовых параметров, описывающих состояние исследуемых процессов, относительно периодов времени и являются основными в задачах прогнозирования.

В настоящее время для решения задач прогнозирования в большей степени используется статическое моделирование, которое не рассматривает изменение базовых параметров процессов по времени, т. е. считает его постоянным. В рамках статических моделей решение задач прогнозирования осуществляется с использованием методов и алгоритмов линейного, выпуклого и нелинейного математического программирования, динамического программирования, эконометрики и др. (см., например, [1–5]).

Модели динамического моделирования функционирования предприятий позволяют описывать изменение базовых параметров, характеризующих производственные процессы в зависимости от заданных периодов времени, и использовать их для решения актуальных задач прогнозирования.

Основным инструментарием решения задач прогнозирования при динамическом моделировании являются стохастические модели и методы, включая эконометрические.

Реализация решений с использованием таких методов осуществляется на основе имеющейся статистической информации, к которой предъявляются требования, соответствующие аксиоматике теории вероятностей.

В рамках стохастического подхода широкую практику имеют методы экстраполяции динамических рядов имеющихся данных об исследуемых процессах. Разработаны различные методы, позволяющие решать задачи прогнозирования изменения и оценивания рядов данных в будущие периоды времени [7, 8]. При применении моделей временных рядов нужно учитывать, что попытки распространения существовавших ранее закономерностей исследуемого процесса на будущие периоды времен часто могут давать результаты, которые не будут совпадать с реальными данными, т. к. возможны изменения как условий реализации процесса, так и его динамики.

Отметим, что стохастические модели и методы должны в обязательном порядке удовлетворять аксиоматике теории вероятностей, основные постулаты которой содержательно можно описать следующим образом: количество экспериментов с используемыми данными (переменными) должно быть достаточно велико; все эксперименты с используемыми данными должны осуществляться в одинаковых условиях; все реализации используемых данных должны быть независимыми (реализация одной переменной не должна зависеть от реализации других переменных); необходима повторяемость результатов проводимых экспериментов с используемыми данными. Пренебрежение соблюдением этих постулатов при разработке стохастических моделей неизбежно приведет к большим погрешностям формируемых результатов при их использовании на практике. Такие жесткие требования к стохастическим моделям обязывают исследователей быть предельно внимательными при разработке моделей и методов прогнозирования в рамках стохастического подхода и очень сужают сферы его применения.

В настоящее время важным инструментарием решения задач прогнозирования в различных системах являются технологии нейросетевого моделирования, истоками которого служат функции нейронов мозга человека. Ускоренное развитие информационных технологий способствует широкому использованию нейросетевых моделей и методов для решения различных задач практической экономики (см., например, [9–11]).

Основой разработки нейронных сетей служат известные технологии обучения и приобретения знаний, которые реализуются в мозге человека. Поэтому нейросетевые модели позволяют осуществлять симуляцию различных технических, экономических, медицинских и других систем. Важным преимуществом нейросетевого подхода является то, что не требуется иметь формализованную модель исследуемого объекта или процесса, т. к. существуют слабо формализуемые системы или это очень трудно реализовать. Следует отметить, что для успешного применения нейронных сетей требуются большие выборки данных для их обучения, что часто становится непреодолимым барьером для их применения.

Другим важными и широкими направлениями при исследовании и решении задач прогнозирования в экономике являются синергетическое и имитационное моделирование (см., например, [12]). С их помощью разрабатываются методики решения задач прогнозирования параметров динамических социально-экономических процессов, функционирующих в сложных информационных условиях, на основе использования соответствующих комплексов компьютерных программных систем.

В последние десятилетия успешно развивается экономико-математическое моделирование различных бизнес-процессов с помощью детерминированных управляемых динамических систем, для разработки которых требуются менее жесткие условия и ограничения, необходимые при реализации стохастического моделирования. Такой подход

успешно применяется для решения различных типов динамических оптимизационных задач (см., например, [13–17]).

Основные цели данного исследования – разработка новой детерминированной динамической управляемой экономико-математической модели производственной системы при наличии рисков, а также новой методики гарантированного (минимаксного) оценивания ее прогнозируемых состояний.

В данной статье, в отличие от большей части имеющихся работ по данной тематике, рассматривается задача прогнозирования и оценивания состояния производственной системы при наличии рисков, в рамках детерминированного минимаксного подхода [18–20]. Описывается новая дискретная управляемая динамическая система, которая развивает модели из работ [21–23] и формализует многошаговый процесс выпуска продукции предприятия при наличии рисков. Данная модель содержит фазовый вектор системы, описывающий основные параметры предприятия в конкретный период времени, вектор управляющего воздействия (управления) и вектор рисков (априори неопределенных возмущений, погрешностей моделирования и т. п.). Предполагается, что значения управляющего воздействия (допустимых сценариев управления) реализуются из конечного множества допустимых элементов соответствующего конечномерного векторного пространства, а реализации значений фазового вектора модели и вектора рисков ограничены заданными многогранниками-компактами в соответствующих конечномерных векторных пространствах. Предлагается измерять качество множества прогнозируемых фазовых состояний моделирующей управляемой динамической системы в заданный период времени – ее прогнозного множества, с помощью соответствующих минимаксных оценок – чебышевского центра и величины чебышевского радиуса этого множества (см., например, [20]). В рамках сформированной экономико-математической модели представлена формализация

задачи прогнозирования и гарантированного (минимаксного) оценивания фазовых состояний модели производственной системы в заданный период времени.

На основе результатов работ [20–24] предложены методики формирования и минимаксного оценивания прогнозного множества фазовых состояний модели выпуска продукции предприятия в заданный период времени, которая реализуется в виде конечной последовательности решений только одношаговых задач – выполнения алгебраических операций над векторами в соответствующих конечномерных векторных пространствах, линейного и выпуклого математического программирования, выполнения операций перехода от вершинного описания выпуклых многогранников-компактов (с конечным числом вершин) к их описанию соответствующими конечными системами линейных алгебраических уравнений и неравенств, и наоборот, поиска решений конечных систем линейных алгебраических уравнений и неравенств. На основании разработанной методики можно создавать соответствующие численные алгоритмы и компьютерные программные приложения для решения исследуемой задачи прогнозирования и минимаксного оценивания. Полученные результаты могут быть использованы для разработки интеллектуальных информационных систем поддержки принятия управленческих решений на производственных предприятиях при решении различных оптимизационных задач. Экономико-математические модели таких задач представлены, например, в работах [1–5].

### **Построение экономико-математической модели управления производственной системой, функционирующей при наличии рисков**

Ниже приведем формализацию дискретной управляемой модели, описывающей ди-

намику основных параметров производственной системы и имеющиеся ограничения в рассматриваемом процессе прогнозирования ее состояний.

Пусть на заданном целочисленном промежутке времени (далее просто – промежутке времени)  $\overline{0, T} = \{0, 1, \dots, T\}$  ( $T \in \mathbf{N}$ ;  $t \in \overline{0, T}$ , например, месяц, квартал, год; здесь и далее  $\mathbf{N}$  – множество всех натуральных чисел) рассматривается процесс управления выпуском продукции предприятия. Тогда, используя результаты работ [21–23], можно сформировать следующую новую систему линейных дискретных рекуррентных уравнений, описывающую динамику рассматриваемого процесса, управляющее воздействие и учитывающую наличие рисков (априори неопределенных возмущений):

$$\begin{cases} y(t+1) = H(t)y(t) + \bar{u}(t) - s(t) + (\omega^{(1)}(t))' \varepsilon^{(1)}(t), \quad y(0) = y_0 = \mathbf{0}_{\bar{n}}, \quad s(0) = s_0 = \mathbf{0}_{\bar{n}}, \\ z(t+1) = R(t)z(t) + v(t) - \bar{A}(t)\bar{u}(t) + (\omega^{(2)}(t))' \varepsilon^{(2)}(t), \quad z(0) = z_0, \\ k(t+1) = \gamma(t)k(t) + \alpha \cdot (\langle c(t), s(t) \rangle_{\bar{n}} - \langle q(t), l(t) \rangle_m - \langle p(t), y(t) \rangle_{\bar{n}} - \langle d(t), z(t) \rangle_m) - \\ - \beta(t) \cdot G + \omega^{(3)}(t) \varepsilon^{(3)}(t), \\ k(0) = k_0 = G + G_0, \\ Z(t+1) = Z(t) + \langle q(t), l(t) \rangle_m + \langle p(t), y(t) \rangle_{\bar{n}} + \langle d(t), z(t) \rangle_m + \beta(t)G + \omega^{(4)}(t) \varepsilon^{(4)}(t), \\ Z(0) = \langle p(0), y(0) \rangle_{\bar{n}} + \langle d(0), z(0) \rangle_m, \quad t \in \overline{0, T-1}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{n}$  – общее количество видов готовой продукции предприятия,  $\bar{n} \in \mathbf{N}$ ;

$m$  – общее количество типов ресурсов, из которых можно произвести данную продукцию,  $m \in \mathbf{N}$ ;

$y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_{\bar{n}}(t))'$  – вектор объемов остатков готовой продукции, хранящейся на складах предприятия в период времени  $t$ ,  $y(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$  ( $t \in \overline{0, T}$ ); здесь и далее для  $\delta \in \mathbf{N}$ ,  $\mathbf{R}^{\delta}$  –  $\delta$ -мерное векторное пространство векторов-столбцов, даже если из экономии места они записаны в строку;  $\mathbf{0}_{\bar{n}} = \underbrace{(0, 0, \dots, 0)'}_{\bar{n}} \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$ ;

$z(t) = (z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t))'$  – вектор объемов остатков производственных ресурсов, хранящихся на складах предприятия в период времени  $t$ ,  $z(t) \in \mathbf{R}^m$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$\bar{A}(t) = \left\| \bar{a}_{ij}(t) \right\|_{\substack{i \in \overline{1, m} \\ j \in \overline{1, \bar{n}}}}$  – матрица норм затрат ресурсов в период времени  $t$  размерности  $(m \times \bar{n})$

( $t \in \overline{0, T-1}$ ;  $\bar{a}_{ij}(t)$  – количество ресурса  $i$ -го типа, необходимого для изготовления единичного объема продукции  $j$ -го вида,  $i \in \overline{1, m}$ ,  $j \in \overline{1, \bar{n}}$ );

$\bar{u}(t) = (\bar{u}_1(t), \bar{u}_2(t), \dots, \bar{u}_{\bar{n}}(t))'$  – вектор интенсивностей производства готовой продукции в период времени  $t$ ,  $\bar{u}(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$v(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_m(t))'$  – вектор интенсивностей пополнения складских ресурсов в период времени  $t$ ,  $v(t) \in \mathbf{R}^m$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$\varepsilon(t) = ((\varepsilon^{(1)}(t))', (\varepsilon^{(2)}(t))', (\varepsilon^{(3)}(t))', (\varepsilon^{(4)}(t))')'$  – вектор рисков (неконтролируемых возмущений) в системе в период времени  $t$ ,  $\varepsilon(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}+m+2}$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$\omega(t) = ((\omega^{(1)}(t))', (\omega^{(2)}(t))', (\omega^{(3)}(t))', (\omega^{(4)}(t))')'$  – заданный вектор в период времени  $t$ ,  $\omega(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}+m+2}$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$s(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_{\bar{n}}(t))'$  – заданный (прогнозируемый) вектор объемов спроса на готовую продукцию, выпускаемую в период времени  $t$ ,  $s(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$s_0 = (s_1(0), s_2(0), \dots, s_{\bar{n}}(0))' = \mathbf{0}_{\bar{n}}$  – вектор начального объема спроса на готовую продукцию при реализации процесса управления в начальный период времени (при  $t = 0$ ),  $s_0 \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$ ;

$z_0=(z_1(0),z_2(0),\dots,z_m(0))'$  – вектор начального объема производственных ресурсов при реализации процесса управления в начальный период времени (при  $t=0$ ),  $z_0 \in \mathbf{R}^m$ ; если в начале периода времени  $t(t \in \overline{0, T-1})$  на складе имелись запасы готовой продукции в количестве  $y(t)$ , то к концу этого периода для реализации будет годна только ее часть, равная  $H_{\bar{n}}(t)y(t)$ , где  $H_{\bar{n}}(t)=\|h_{ij}(t)\|_{j \in \overline{1, \bar{n}}}$  есть диагональная матрица порядка  $\bar{n}$ , характеризующая «старение» продукции за этот период; для запасов производственных ресурсов, описываемых вектором  $z(t)$ , к концу периода  $t(t \in \overline{0, T-1})$  для использования в производстве будет годна только их часть, равная  $R_m(t)z(t)$ , где  $R_m(t)=\|r_{ii}(t)\|_{i \in \overline{1, m}}$  – диагональная матрица порядка  $m$ , характеризующая «старение» производственных ресурсов за этот период времени; финансовые средства на инвестиции в расширение производства в начальный период управления (при  $t=0$ ) предприятие предполагает формировать на основе банковского кредита в объеме  $G$  и собственных финансовых ресурсов  $G_0$ , отчисляемых от чистой прибыли и направляемых на расширение производства;

$k(t)$  – количество доступных финансовых средств, имеющихся к началу периода  $t(t \in \overline{0, T-1})$ ;

$\gamma(t)$  – числовой коэффициент ( $0 \leq \gamma(t) \leq 1$ ), характеризующий «непредвиденные издержки» финансовых ресурсов за период  $t(t \in \overline{0, T-1})$ ;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий долю налоговых отчислений от прибыли;

$\beta(t)=r/100+\beta_\rho(t)$ , здесь  $r$  – годовая процентная ставка за пользование кредитом,  $\beta_\rho(t)$  – доля возвращаемого кредита в период  $t(t \in \overline{0, T-1})$ ;

$c(t)=(c_1(t), c_2(t), \dots, c_{\bar{n}}(t))'$  – вектор реальных закупочных цен на реализованную продукцию, произведенную предприятием в период времени  $t$ ,  $c(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$q(t)=(q_1(t), q_2(t), \dots, q_{\bar{n}}(t))'$  – вектор реальных цен на производственные ресурсы, необходимые предприятию для производства продукции в период времени  $t$ ,  $q(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$p(t)=(p_1(t), p_2(t), \dots, p_{\bar{n}}(t))'$  – вектор затрат предприятия на хранение на складе остатков готовой продукции в период времени  $t$ ,  $p(t) \in \mathbf{R}^{\bar{n}}$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

$d(t)=(d_1(t), d_2(t), \dots, d_m(t))'$  – вектор затрат предприятия на хранение на складе остатков производственных ресурсов в период времени  $t$ ,  $d(t) \in \mathbf{R}^m$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ );

вектор  $l(t)=(\langle \bar{a}_1^{(1)}(t), \bar{u}(t) \rangle_{\bar{n}}, \langle \bar{a}_2^{(1)}(t), \bar{u}(t) \rangle_{\bar{n}}, \dots, \langle \bar{a}_m^{(1)}(t), \bar{u}(t) \rangle_{\bar{n}})' \in \mathbf{R}^m$  (здесь и далее для  $\delta \in \mathbf{N}$  символом  $\langle a, b \rangle_\delta$  будем обозначать скалярное произведение векторов  $a$  и  $b$  в пространстве  $\mathbf{R}^\delta$ ); вектор  $\bar{a}_i^{(1)}(t)=(\bar{a}_{i1}(t), \bar{a}_{i2}(t), \dots, \bar{a}_{im}(t))' \in \mathbf{R}^{\bar{m}}$  ( $i \in \overline{1, m}$ );

$Z(t)$  – общие суммарные издержки предприятия за  $t$  периодов времени ( $t \in \overline{0, T-1}$ ).

Отметим, что параметры  $\bar{A}(t)$ ,  $H(t)$ ,  $R(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $s(t)$ ,  $c(t)$ ,  $q(t)$ ,  $p(t)$ ,  $d(t)$ ,  $\alpha$ ,  $\beta(t)$ ,  $\gamma(t)$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ,  $k_0$ ,  $G$ ,  $G_0$  в системе (1) для всех  $t \in \overline{0, T-1}$  должны быть известны заранее (например, формироваться исходя из имеющихся статистических данных о рассматриваемом процессе, технических и экономических прогнозов и других источников путем применения методов оценивания данных и идентификации параметров рассматриваемой системы).

Пусть вектор  $x(t)=(y_1(t), y_2(t), \dots, y_{\bar{n}}(t), z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t), k(t), Z(t))'$  является фазовым вектором для системы (1) в период времени  $t$ ,  $x(t) \in \mathbf{R}^n$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ ), где  $n = \bar{n} + m + 2$ , вектор  $u(t)=(\bar{u}_1(t), \bar{u}_2(t), \dots, \bar{u}_{\bar{n}}(t), v_1(t), v_2(t), \dots, v_m(t))'$  является вектором управляющего воздействия (управления) для системы (1) в период времени  $t$ ,  $u(t) \in \mathbf{R}^p$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ ), где  $p = \bar{n} + m$ ; вектор  $\varepsilon(t)=(\varepsilon^{(1)}(t))', (\varepsilon^{(2)}(t))', (\varepsilon^{(3)}(t))', (\varepsilon^{(4)}(t))'=(\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_n(t))'$  является вектором рисков для системы (1) в период времени  $t$ ,  $\varepsilon(t) \in \mathbf{R}^n$  ( $t \in \overline{0, T-1}$ ).

Тогда систему (1), которая моделирует динамику рассматриваемого процесса выпуска продукции предприятия – объекта I, можно представить в форме векторного линейного дискретного рекуррентного уравнения вида

$$x(t+1)=A(t)x(t)+B(t)u(t)+\omega(t)(\varepsilon(t))', x(0)=x_0, t \in \overline{0, T-1}, \quad (2)$$

где вид матриц  $A(t)$  и  $B(t)$  подробно описывается в работе [22]. Матрицы  $A(t)$  и  $B(t)$  есть действительные матрицы порядков  $(n \times n)$  и  $(n \times p)$  соответственно; вектор  $\omega(t) = ((\omega^{(1)}(t))', (\omega^{(2)}(t))', (\omega^{(3)}(t))', (\omega^{(4)}(t))')' = (\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_n(t))'$  является заданным для каждого периода времени  $t$ ,  $\omega(t) \in \mathbf{R}^n (t \in \overline{0, T-1})$ .

Отметим, что система (2) позволяет моделировать динамику многошагового процесса управления выпуском продукции предприятия, т. е. объектом  $I$ , в зависимости от заданных начальных условий для фазового вектора, выбора конкретных реализаций управляющего воздействия (управления) и вектора рисков.

Предполагается, что в рассматриваемом процессе управления выпуском продукции предприятия для каждого периода времени  $t(t \in \overline{0, T})$  значения фазового вектора  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))' \in \mathbf{R}^n$  должны удовлетворять следующему заданному геометрическому ограничению:

$$x(t) \in \mathbf{X}^*(t) \subset \mathbf{R}^n, \tag{3}$$

где каждое множество  $\mathbf{X}^*(t) \neq \emptyset$  и есть выпуклый многогранник-компакт в пространстве  $\mathbf{R}^n$ , определяющий имеющиеся в процессе производства *техничко-экономические ограничения* на основные параметры продукции предприятия. Для каждого периода времени  $t(t \in \overline{0, T})$  соответствующее множество  $\mathbf{X}^*(t)$  может быть задано, например, в виде многомерного параллелепипеда в пространстве  $\mathbf{R}^n$ , а именно с помощью формулы

$$\mathbf{X}^*(t) = \{x(t) : x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))' \in \mathbf{R}^n, \forall i \in \overline{1, n} : 0 \leq x_i(t) \leq x_i^*(t)\},$$

где  $\forall i \in \overline{1, n} : x_i^*(t) \in \mathbf{R}^1, x_i^*(t) \geq 0$ .

В рассматриваемом процессе управления для каждого периода времени  $t(t \in \overline{0, T-1})$  значения вектора управления  $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t))' \in \mathbf{R}^p$ , которым распоряжается субъект управления – менеджер  $P$ , должны удовлетворять следующему заданному ограничению:

$$u(t) \in \mathbf{U}^*(t) = \{u^{(1)}(t), u^{(2)}(t), \dots, u^{(K_i)}(t)\} \subset \mathbf{R}^p, \tag{4}$$

где  $K_i \in \mathbf{N}$  каждое множество  $\mathbf{U}^*(t) \neq \emptyset$  и есть конечное множество из  $K_i$  векторов в пространстве  $\mathbf{R}^p$ , определяющее возможные в процессе производства *техничко-экономические ограничения на ресурсы управления* выпуском продукции предприятия, т. е. определяет ресурс (возможные сценарии) управления.

Для каждого периода времени  $t(t \in \overline{0, T-1})$  значения вектора рисков  $\varepsilon(t) = (\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_n(t))' \in \mathbf{R}^n$ , влияющего на динамику процесса управления выпуском продукции предприятия, должны удовлетворять следующему заданному геометрическому ограничению:

$$\varepsilon(t) \in \mathbf{E}^*(t) \subset \mathbf{R}^n, \tag{5}$$

где каждое множество  $\mathbf{E}^*(t) \neq \emptyset$  и есть выпуклый многогранник-компакт в пространстве  $\mathbf{R}^n$ , определяющий ограничение на значения этого вектора. Отметим, что для каждого периода времени  $t(t \in \overline{0, T})$  соответствующее множество  $\mathbf{E}^*(t)$  может быть задано, например, в виде многомерного параллелепипеда в пространстве  $\mathbf{R}^n$ , а именно с помощью формулы

$$\mathbf{E}^*(t) = \{\varepsilon(t) : \varepsilon(t) = (\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_n(t))' \in \mathbf{R}^n, \forall i \in \overline{1, n} : 0 \leq \varepsilon_i(t) \leq \varepsilon_i^*(t)\},$$

где  $\forall i \in \overline{1, n} : \varepsilon_i^*(t) \in \mathbf{R}^1, \varepsilon_i^*(t) \geq 0$ .

Опишем информационные возможности менеджера  $P$  в процессе минимаксного оценивания прогнозируемых состояний производственной системы, функционирующей при наличии рисков на основе сформированной дискретной управляемой динамической системы (1) – (5).

Пусть на рассматриваемом целочисленном промежутке времени  $\overline{0, T} (T \in \mathbf{N})$  для любого периода времени  $\tau(\tau \in \overline{0, T-1})$  в рассматриваемом процессе прогнозирования менеджером  $P$  измеряется и запоминается вектор  $x(\tau) = x_\tau \in \mathbf{X}^*(\tau)$  – фазовый вектор системы (2) в период времени  $\tau(x(0) = x_0 \in \mathbf{X}^*(0))$ . Предполагается также, что система уравнений (2), описывающая динамику модели объекта  $I$ , и ограничения (3) – (5) для него также известны.

## Формализация задачи прогнозирования и минимаксного оценивания состояний производственной системы

Введем ряд определений, которые нужны для строгой математической формализации задачи прогнозирования и минимаксного оценивания состояний рассматриваемой производственной системы, описываемой экономико-математической моделью (1) – (5).

Здесь и далее для любых множеств  $X$  и  $Y$  множество  $X \times Y$  есть произведение  $X$  и  $Y$ , т. е. множество всех пар  $(x, y)$  таких, что  $x \in X, y \in Y$  (использование аналогичных обозначений справедливо и для большего числа множеств).

Для фиксированного периода времени  $\tau (\tau \in \overline{0, T-1})$  на основании ограничения (4) определим множество  $\mathbf{U}(\tau, \overline{T}) \subset \mathbf{R}^{(T-\tau) \times p}$  допустимых программных управлений менеджера  $P$  на промежутке времени  $\tau, \overline{T}$  следующим соотношением:

$$\mathbf{U}(\tau, \overline{T}) = \{u_\tau(\cdot) : u_\tau(\cdot) \in \mathbf{R}^{(T-\tau) \times p}, u_\tau(\cdot) = \{u_\tau(t)\}_{t \in \tau, \overline{T-1}}, \forall t \in \tau, \overline{T-1}, u_\tau(t) \in \mathbf{U}^*(t)\}. \quad (6)$$

Аналогичным образом для фиксированного периода времени  $\tau \in \overline{0, T-1}$  на основании ограничения (5) определим множество  $\mathbf{E}(\tau, \overline{T}) \subset \mathbf{R}^{(T-\tau) \times n}$  допустимых программных рисков на промежутке времени  $\tau, \overline{T}$  следующим соотношением:

$$\mathbf{E}(\tau, \overline{T}) = \{\varepsilon_\tau(\cdot) : \varepsilon_\tau(\cdot) \in \mathbf{R}^{(T-\tau) \times n}, \varepsilon_\tau(\cdot) = \{\varepsilon_\tau(t)\}_{t \in \tau, \overline{T-1}}, \forall t \in \tau, \overline{T-1}, \varepsilon_\tau(t) \in \mathbf{E}^*(t)\}. \quad (7)$$

Назовем набор  $w(\tau) = \{\tau, x(\tau)\} \in \overline{0, T} \times \mathbf{R}^n (w(0)) = w_0 = \{0, x_0\}$   $\tau$ -позицией дискретной управляемой динамической системы (1) – (5), или просто  $\tau$ -позицией системы. Для каждого  $\tau \in \overline{0, T}$  определим также множество  $\mathbf{W}(\tau) = \{\tau\} \times \mathbf{R}^n (\mathbf{W}(0) = \mathbf{W}_0 = \{w(0) = w_0 : w_0 = \{0, x_0\} \in \{0\} \times \mathbf{R}^n\})$  всех допустимых  $\tau$ -позиций рассматриваемой системы.

Далее пусть  $x(\cdot) = \varphi_{\tau, \overline{T}}(\cdot; x_\tau, u_\tau(\cdot), \varepsilon_\tau(\cdot))$  – допустимая на промежутке времени  $\tau, \overline{T}$  фазовая траектория системы (1), соответствующая допустимому набору  $(w(\tau), u_\tau(\cdot), \varepsilon_\tau(\cdot)) \in \mathbf{W}(\tau) \times \mathbf{U}(\tau, \overline{T}) \times \mathbf{E}(\tau, \overline{T}) (w(\tau) = w_\tau = \{\tau, x_\tau\}, w(0) = w_0 = \{0, x_0\})$ , если  $\forall t \in \tau, \overline{T} : x(t) = \varphi_{\tau, \overline{T}}(t; x_\tau, u_\tau(\cdot), \varepsilon_\tau(\cdot)) \in \mathbf{X}^*(\tau), x(\tau) = x_\tau$ , где  $\varphi_{\tau, \overline{T}} : \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^{(T-\tau) \times p} \times \mathbf{R}^{(T-\tau) \times n} \rightarrow \mathbf{R}^{(T-\tau+1) \times n}$  – оператор правой части системы (1), действующий на промежутке времени  $\tau, \overline{T}$ .

Обозначим символом  $\mathbf{X}(\cdot; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$  трубку всех допустимых фазовых траекторий  $x(\cdot) = \varphi_{\tau, \overline{T}}(\cdot; x_\tau, u_\tau(\cdot), \varepsilon_\tau(\cdot))$  системы (1) [19, 20], соответствующую паре  $(w(\tau), u_\tau(\cdot)) \in \mathbf{W}(\tau) \times \mathbf{U}(\tau, \overline{T})$ , а через  $\mathbf{X}(t; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$  – ее сечение в период времени  $t \in \tau, \overline{T} (\mathbf{X}(t; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot)) = \{x(t)\} = \{x_t\})$ , т. е. это множество всех допустимых фазовых траекторий данной системы, которое определяется следующей формулой:

$$\mathbf{X}(\cdot; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot)) = \{x(\cdot) : x(\cdot) \in \mathbf{R}^{(T-\tau+1) \times n}, x(\cdot) = \varphi_{\tau, \overline{T}}(\cdot; x_\tau, u_\tau(\cdot), \varepsilon_\tau(\cdot)), \forall t \in \tau, \overline{T}, x(t) \in \mathbf{X}^*(t), \varepsilon_\tau(\cdot) \in \mathbf{E}(\tau, \overline{T})\}. \quad (8)$$

Для периода времени  $t \in \tau+1, \overline{T}$  назовем множество  $\mathbf{X}(t; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$  прогнозным множеством или областью достижимости [18–20] объекта  $I$  в этот период времени, которое есть множество всех допустимых фазовых векторов  $x(t)$ , соответствующих допустимой реализации пары  $(w(\tau), u_\tau(\cdot))$ , т. е. это множество тех и только тех фазовых векторов объекта  $I$ , таких что существует допустимая реализация вектор-функции рисков  $\varepsilon_\tau(\cdot) \in \mathbf{E}(\tau, \overline{T})$ , для которых справедливо  $x(t) = \varphi_{\tau, \overline{T}}(t; x_\tau, u_\tau(\cdot), \varepsilon_\tau(\cdot)) \in \mathbf{X}(t; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$ .

Можно показать (аналогично рассуждениям, представленным в работе [20]), что для рассматриваемой динамической системы (1) – (5) каждое прогнозное множество  $\mathbf{X}(t; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$ ,  $t \in \tau, \overline{T}$  является выпуклым многогранником-компактом в пространстве  $\mathbf{R}^n$ .

Для оценки качества процесса прогнозирования фазовых состояний объекта  $I$  в период времени  $t \in \tau+1, \overline{T}$  предлагается использовать минимаксные показатели прогнозного множества  $\mathbf{X}(t; \tau, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$  – его чебышевский центр и чебышевский радиус (см., например, [20]), которые определяются по формуле

$$\Phi(x_\tau, u_\tau(\cdot)) = \{ (r_i^{(e)}, x_i^{(e)}) : (r_i^{(e)}, x_i^{(e)}) \in \mathbf{R}^1 \times \mathbf{R}^n = \mathbf{R}^{n+1}, \\ r_i^{(e)} = \mathbf{r}(\mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))) = \max_{x^{(2)}(t) \in \mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))} \|x_i^{(e)} - x^{(2)}(t)\|_n = \\ = \min_{x^{(1)}(t) \in \mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))} \max_{x^{(2)}(t) \in \mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))} \|x^{(1)}(t) - x^{(2)}(t)\|_n \} \quad (9)$$

и являются значениями целевой функции (функционала)  $\Phi: \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^{(T-\tau)p} \rightarrow \mathbf{R}^{n+1}$ . В формуле (9)  $\mathbf{r}: \mathbf{2}^{\mathbf{R}^n} \rightarrow \mathbf{R}^1$  – заданный функционал, значения которого  $\mathbf{r}^{(e)} = \mathbf{r}(X)$  равны величине чебышевского радиуса множеств  $X \in \mathbf{2}^{\mathbf{R}^n}$ ; вектор  $x_i^{(e)} \in \mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$ , удовлетворяющий условию минимакса в формуле (9), называется чебышевским центром рассматриваемого прогнозного множества  $\mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$ ;  $\|x\|_n$  – значение евклидовой нормы для вектора  $x \in \mathbf{R}^n$ ;  $\mathbf{2}^{\mathbf{R}^n}$  – множество всех подмножеств пространства  $\mathbf{R}^n$ .

Отметим, что  $n$ -мерный шар в пространстве  $\mathbf{R}^n$  с центром в векторе  $x_i^{(e)}$  и радиусом, равным  $\mathbf{r}_i^{(e)} = \mathbf{r}(\mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot)))$ , является  $n$ -мерным шаром наименьшего радиуса, содержащим прогнозное множество  $\mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$ , т. е. рассматриваемые минимаксные оценки прогнозного множеств имеют совершенно наглядный смысл и являются удобным инструментом для его описания.

Тогда на основании сформированной экономико-математической модели (1) – (9) можно сформулировать следующую многошаговую задачу минимаксного оценивания прогнозируемого состояния производственной системы при наличии рисков.

**Задача.** Для заданных целочисленного промежутка времени  $\overline{0, T}$ , периода времени  $\tau (\tau \in \overline{0, T-1})$  и  $\tau$ -позиции  $w(\tau) = \{\tau, x(\tau)\} = \{\tau, x_\tau\} = w_\tau \in \mathbf{W}(\tau)$  ( $w(0) = \{0, x(0)\} = \{0, x_0\} = w_0 \in \mathbf{W}_0$ ) дискретной управляемой динамической системы (1) – (5) менеджеру  $P$  для любого периода времени  $t \in \tau+1, T$  требуется сформировать прогнозное множество  $\mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$  и его минимаксные оценки –  $\mathbf{r}_i^{(e)} = \mathbf{r}(\mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot)))$  и  $x_i^{(e)} \in \mathbf{X}(t; \overline{\tau, T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))$ , которые есть соответственно значение величины его чебышевского радиуса и чебышевский центр, удовлетворяющие условию минимакса в формуле (9), путем реализации конечного числа одношаговых операций, допускающих их алгоритмизацию.

Основываясь на результатах работ [20, 21], можно показать, что решение сформулированной задачи существует.

## Методика прогнозирования и минимаксного оценивания состояний производственной системы при наличии рисков

На основании результатов, изложенных в работах [20, 21], предлагается методика решения сформулированной задачи прогнозирования и минимаксного оценивания состояний производственной системы при наличии рисков на основе сформированной экономико-математической модели (1) – (9), которая описывается в виде реализации нижеследующей последовательности действий.

1. Для заданного целочисленного промежутка времени  $\overline{0, T} (T \in \mathbf{N})$  и каждого периода времени  $t \in \overline{0, T-1}$  формируются все исходные данные, описывающие систему дискретных рекуррентных уравнений вида (1).

2. На основании данных, описывающих систему (1), формируются матрицы  $A(t)$  и  $B(t)$  порядков  $(n \times n)$  и  $(n \times p)$  соответственно, начальный фазовый вектор  $x(0) = (x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0))'$  =

$= x_0 \in \mathbf{R}^n$ , а также вектор  $\omega(t) = (\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_n(t))' \in \mathbf{R}^n$  для каждого периода времени  $t \in \overline{0, T-1}$ .

3. Формируется дискретное рекуррентное уравнение вида (2).

4. Менеджером  $P$  формируются данные, описывающие заданные ограничения (3) – (5):

4.1) векторы  $x^*(t) = (x_1^*(t), x_2^*(t), \dots, x_n^*(t))' \in \mathbf{R}^n$ , задающие для каждого периода времени  $t \in \overline{0, T}$  множества  $\mathbf{X}^*(t)$ , описывающие ограничение вида (3) на реализации фазового вектора системы;

4.2) наборы векторов  $\{u^{(1)}(t), u^{(2)}(t), \dots, u^{(k_i)}(t)\} \subset \mathbf{R}^p$ , задающие для каждого периода времени  $t \in \overline{0, T-1}$  множества  $\mathbf{U}^*(t)$ , описывающие ограничение вида (4) на реализации управления;

4.3) векторы  $\varepsilon^*(t) = (\varepsilon_1^*(t), \varepsilon_2^*(t), \dots, \varepsilon_n^*(t))' \in \mathbf{R}^n$ , задающие для каждого периода времени  $t \in \overline{0, T-1}$  множества  $\mathbf{E}^*(t)$ , описывающие ограничение вида (5) на реализации вектора рисков.

5. Менеджером  $P$  вводится заданный период времени  $\tau \in \overline{0, T-1}$  и измеряется фазовый вектор  $x(\tau)$  системы (2). Тогда если  $x(\tau) \in \mathbf{X}^*(\tau)$ , то выполняется следующее действие 6, в противном случае, т. е. при  $x(\tau) \notin \mathbf{X}^*(\tau)$ , делается вывод, что реализация фазового вектора системы является недопустимой и процедура прекращается.

6. Менеджером  $P$  формируется  $\tau$ -позиция  $w(\tau) = \{\tau, x(\tau)\} = \{\tau, x_\tau\} = w_\tau \in \mathbf{W}(\tau)$  ( $w(0) = \{0, x(0)\} = \{0, x_0\} = w_0 \in \mathbf{W}_0$ ) дискретной управляемой динамической системы (1) – (5).

7. На основании формулы (6) формируется конечное множество  $\mathbf{U}(\tau, T)$  всех допустимых программных управлений менеджера  $P$  на промежутке времени  $\tau, T$ .

8. Менеджером  $P$  осуществляется выбор любого (или заданного) допустимого программного управления  $u_\tau^*(\cdot) = \{u_\tau^*(t)\}_{t \in \overline{\tau, T-1}} \in \mathbf{U}(\tau, T)$  на промежутке времени  $\tau, T$ .

9. Для заданного менеджером  $P$  периода времени  $t (t \in \overline{\tau+1, T})$ , используя *общий рекуррентный алгебраический метод* [20, 21] построения прогнозного множества (области достижимости) линейной дискретной управляемой динамической системы [20, 21], реализуется построение прогнозного множества  $\mathbf{X}(t; \tau, T, x_\tau, u_\tau^*(\cdot))$  – осуществляется путем реализации конечной последовательности поиска решений только одношаговых задач – выполнения алгебраических операций над векторами в пространствах  $\mathbf{R}^n$  и  $\mathbf{R}^p$ , линейного математического программирования, выполнения операций перехода от вершинного описания выпуклых многогранников-компактов (с конечным числом вершин) к их описанию соответствующими конечными системами линейных алгебраических уравнений и неравенств, и наоборот, поиска решений конечных систем линейных алгебраических уравнений и неравенств, т. е. к реализации конечной последовательности решений только одношаговых операций, допускающих их алгоритмизацию.

10. Формируется описание прогнозного множества  $\mathbf{X}(t; \tau, T, x_\tau, u_\tau^*(\cdot)) = \mathbf{X}^{(+)}(t)$ , которое является выпуклым многогранником-компактом (с конечным числом вершин) в пространстве  $\mathbf{R}^n$ , в виде конечного множества  $\Gamma_n(\mathbf{X}^{(+)}(t))$  всех его вершин  $t \in \overline{\tau+1, T}$  [20, 21].

11. Для заданного менеджером  $P$  периода времени  $t (t \in \overline{\tau+1, T})$ , используя *метод редукции к задаче выпуклого математического программирования* [20], вычисляются минимаксные оценки  $\mathbf{r}_t^{(e)} = \mathbf{r}(\mathbf{X}(t; \tau, T, x_\tau, u_\tau^*(\cdot)))$  и  $x_t^{(e)} \in \mathbf{X}(t; \tau, T, x_\tau, u_\tau^*(\cdot))$  прогнозного множества  $\mathbf{X}^{(+)}(t) = \mathbf{X}(t; \tau, T, x_\tau, u_\tau^*(\cdot))$ , которые есть соответственно значение величины его чебышевского радиуса и чебышевский центр, удовлетворяющие условию минимакса в формуле (9) путем реализации следующей конечной одношаговой последовательности действий:

11.1) на основе конечного множества  $\Gamma_n(\mathbf{X}^{(+)}(t)) = \{x^{(i)}(t)\}_{i \in \overline{1, m_t}}$  всех вершин многогранника  $\mathbf{X}^{(+)}(t)$  формируются следующие функционалы:

$$\mu_i: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^1, i \in \overline{1, m_i},$$

значения которых для  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))' \in \mathbf{R}^n$  определяются по следующим формулам:

$$\mu_i(x(t)) = \|x(t) - x^{(i)}(t)\|_n, i \in \overline{1, m_i};$$

11.2) вводится дополнительная действительная переменная  $x_{n+1}(t)$  и формируется система выпуклых неравенств

$$\mu_i(x(t)) \leq x_{n+1}(t), i \in \overline{1, m_i},$$

т. е. система вида

$$\mathbf{X}_{|n+1}(t): \left( \sum_{j=1}^n (x_j(t) - x_j^{(i)}(t))^2 \right)^{1/2} - x_{n+1}(t) \leq 0, i \in \overline{1, m_i},$$

описывающая множество  $\mathbf{X}_{|n+1}(t)$  всех ее решений;

11.3) формируется следующая задача *выпуклого математического программирования*:

$$\begin{aligned} x_{n+1}(t) &\rightarrow \min, \\ \mu_i(x(t)) &\leq x_{n+1}(t) \leq 0, i \in \overline{1, m_i}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для решения задачи выпуклого математического программирования вида (10) можно использовать, например, итерационный градиентный алгоритм метода Зойтендейка (случай нелинейных ограничений-неравенств) (см, например, [24]). Тогда для части координат сформированного значения вектора  $x_{|n+1}^{(e)}(t) = (x_1^{(e)}(t), x_2^{(e)}(t), \dots, x_n^{(e)}(t), x_{n+1}^{(e)}(t))' \in \mathbf{X}_{|n+1}(t)$  (где  $x_{n+1}^{(e)}(t)$  есть оптимальное значение функционала для задачи (10) – выпуклого математического программирования) будет выполняться (с заданной точностью) следующее минимаксное соотношение:

$$\min_{x(t) \in \mathbf{X}_{|n+1}(t)} \max_{i \in \overline{1, m_i}} \mu_i(x(t)) = \max_{i \in \overline{1, m_i}} \mu_i(x^{(e)}(t)) = \mathbf{r}(\mathbf{X}^{(+)}(t)) = \mathbf{r}(\mathbf{X}(t; \overline{\tau}, \overline{T}, x_\tau, u_\tau(\cdot))) = \mathbf{r}_i^{(e)},$$

т. е. вектор  $x^{(e)}(t) = (x_1^{(e)}(t), x_2^{(e)}(t), \dots, x_n^{(e)}(t))' = x_i^{(e)} \in \mathbf{X}^{(+)}(t)$  является чебышевским центром прогнозного множества  $\mathbf{X}^{(+)}(t) = \mathbf{X}(t; \overline{\tau}, \overline{T}, x_\tau, u_\tau^*(\cdot))$  – его минимаксной оценкой (оптимальной гарантированной оценкой), а число  $x_{n+1}^{(e)}(t) = \mathbf{r}(\mathbf{X}^{(+)}(t)) = \mathbf{r}_i^{(e)} \in \mathbf{R}^1$  есть значение величины его чебышевского радиуса, т. е. значение наименьшей величины радиуса шара с центром в векторе  $x^{(e)}(t)$  в пространстве  $\mathbf{R}^n$ , покрывающего множество  $\mathbf{X}^{(+)}(t)$ .

12. Осуществляется формирование описания прогнозного множества  $\mathbf{X}^{(+)}(t) = \mathbf{X}(t; \overline{\tau}, \overline{T}, x_\tau, u_\tau^*(\cdot))$  и его минимаксных оценок – *чебышевского центра*  $x_i^{(e)} \in \mathbf{X}^{(+)}(t)$  и *чебышевского радиуса*  $\mathbf{r}_i^{(e)} = \mathbf{r}(\mathbf{X}^{(+)}(t))$  в форме, удобной для менеджера  $P$ .

Из выполненных построений следует, что предлагаемая методика решения сформулированной задачи *минимаксного оценивания прогнозируемого состояния производственной системы при наличии рисков* реализуется в виде конечной последовательности решений только одношаговых задач – выполнения алгебраических операций над векторами в пространствах  $\mathbf{R}^n$  и  $\mathbf{R}^p$ , линейного и выпуклого математического программирования, выполнения операций перехода от вершинного описания выпуклых многогранников-компактов (с конечным числом вершин) к их описанию соответствующими конечными системами линейных алгебраических уравнений и неравенств, и наоборот, поиска решений конечных систем линейных алгебраических уравнений и неравенств. Следовательно, построение прогнозного множества  $\mathbf{X}(t; \overline{\tau}, \overline{T}, x_\tau, u_\tau^*(\cdot))$  и его минимаксных оценок сводится к реализации *конечной последовательности только одношаговых операций, допускающих их алгоритмизацию*.

## Заключение

В представленной работе для описания процесса выпуска продукции предприятия разработана дискретная многошаговая управляемая динамическая система при наличии рисков. Предполагается, что значения управляющего воздействия (допустимых сценариев управления) реализуются из конечного множества допустимых элементов соответствующего конечномерного векторного пространства, а реализации значений фазового вектора модели и вектора рисков ограничены заданными многогранниками-компактами в соответствующих конечномерных векторных пространствах. На основании разработанной динамической системы выполнена формализация задачи минимаксного оценивания прогнозируемого состояния производственной системы при наличии рисков. Для решения данной задачи описывается авторская методика формирования и минимаксного оценивания прогнозного множества фазовых состояний модели выпуска продукции предприятия в заданный период времени. Эта методика реализуется в виде конечной последовательности решений только одношаговых задач – выполнения алгебраических операций над векторами в соответствующих конечномерных векторных пространствах, линейного и выпуклого математического программирования, выполнения операций перехода от вершинного описания выпуклых многогранников-компактов (с конечным числом вершин) к их описанию соответствующими конечными системами линейных алгебраических уравнений и неравенств, и наоборот, поиска решений конечных систем линейных алгебраических уравнений и неравенств, т. е. путем реализации только одношаговых операций, допускающих их алгоритмизацию. На основании разработанной методики можно создавать соответствующие численные алгоритмы и компьютерные программные приложения для решения исследуемой задачи прогнозирования и минимаксного оценивания. Полученные в работе результаты основываются на исследованиях [20–24] и могут быть использованы для разработки интеллектуальных информационных систем поддержки принятия управленческих решений на производственных предприятиях при решении различных оптимизационных задач. Экономико-математические модели таких задач представлены, например, в работах [1–5].

## Список литературы

1. *Первозванский А. А.* Математические модели в управлении производством. – М.: Наука, 1975. – 616 с.
2. *Хачатрян С. Р.* Прикладные методы математического моделирования экономических систем: научно-методическое пособие. – М.: Экзамен, 2002. – 192 с.
3. *Ханк Д. Э., Уичерн Д. У., Райтс А. Дж.* Бизнес-прогнозирование: пер. с англ. – 7-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 656 с.
4. *Fogler H. R.* A pattern recognition model for forecasting // *Management science*. 1974. Vol. 20. No. 8. P. 1178–1189. DOI: 10.1287/mnsc.20.8.1178.
5. *Четыркин Е. М.* Статистические методы прогнозирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
6. *Zhu J., Hong J., Hughes J. G.* Using Markov chains for link prediction in adaptive web sites // *Proceedings of the 1st International Conference on Computing in an Imperfect World*. – UK, London, 2002. P. 60–73. DOI: 10.1007/3-540-46019-5\_5.
7. *Бокс Дж., Дженкинс Г. М.* Анализ временных рядов, прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
8. *Singh S.* Pattern modelling in time-series forecasting // *Cybernetics and Systems. International Journal*. 2000. Vol. 31. No. 1. P. 49–65. DOI: 10.1080/019697200124919.
9. *Борисов П. А., Виноградов Г. П., Семенов Н. А.* Интеграция нейросетевых алгоритмов, моделей нелинейной динамики и методов нечеткой логики в задачах прогнозирования // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 1. С. 78–84.

10. Староверов Б. А., Изотов В. А., Мормылев М. А. Повышение точности оперативных прогнозов потребления электроэнергии с помощью нейронных сетей за счет объединения процессов классификации и аппроксимации суточных профилей // Вестник ИГЭУ. 2007. Вып. 4. С. 91–93.
11. Filik U. B., Kurban M. A new approach for the short-term load forecasting with autoregressive and artificial neural network models // International Journal of Computational Intelligence Research. 2007. No. 3. P. 66–71. DOI: 10.5019/j.ijcir.2007.88.
12. Емельянов А. А., Власова Е. А., Дума Р. В. Имитационное моделирование экономических процессов: учебное пособие. – М.: Финансы и статистика, 2014. – 416 с.
13. Альбрехт Э. Г. О динамических моделях макроэкономики. Информационные технологии в экономике: теория, модели и методы: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УрГЭУ, 2005. С. 3–17.
14. Aksonov K., Bykov E., Aksonova O., Goncharova N., Nevolina A. Analysis of simulation modeling systems illustrated with the problem of model design for the subject of technological logistics (WIP) // Society for Modeling & Simulation International (SCS). 2015 Summer Simulation Multi-Conference (SummerSim'15). – Chicago, USA. 26–29 July, 2015. Simulation Series. Vol. 47. Iss. 10. P. 345–348.
15. Babenko V. O. Modelling of factors affecting innovational agricultural activity of enterprises AIC in Ukraine // Scientific bulletin Polesie. 2017. No. 1 (9). P. 115–121. DOI: 10.25140/2410-9576-2017-2-2(10).
16. Ширяев В. И., Ширяев Е. В. Принятие решений: Прогнозирование в глобальных системах: учебное пособие. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 176 с.
17. Шориков А. Ф. Методология моделирования многоуровневых систем: иерархия и динамика // Прикладная информатика. 2006. № 1 (1). С. 136–141.
18. Красовский Н. Н. Теория управления движением. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
19. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
20. Шориков А. Ф. Минимаксное оценивание и управление в дискретных динамических системах. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1997. – 242 с.
21. Тюлюкин В. А., Шориков А. Ф. Об одном алгоритме построения области достижимости линейной управляемой системы // Негладкие задачи оптимизации и управление. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 55–61.
22. Шориков А. Ф., Рассадина Е. С. Динамическая оптимизация комплексного программного управления структурой товарного ассортимента предприятия // Экономика региона. 2012. № 3 (31). С. 261–271. DOI: 10.17059/2012-3-26.
23. Шориков А. Ф., Рассадина Е. С. Динамическая оптимизация комплексного адаптивного управления структурой товарного ассортимента предприятия // Экономика региона. 2013. № 2 (34). С. 176–184. DOI: 10.17059/2013-2-19.
24. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1984. – 583 с.

### Сведения об авторе

Шориков Андрей Федорович, ORCID 0000-0003-1255-0862, докт. физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института экономики УрО РАН; ведущий научный сотрудник Института математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия, afshorikov@mail.ru

### Поддержка исследований

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-28-01868 «Разработка агент-ориентированной модели сетевого промышленного комплекса в условиях цифровой трансформации»).

Статья поступила 19.05.2022, рассмотрена 03.06.2022, принята 20.06.2022

### References

1. Pervozvansky A. A. *Matematicheskie modeli v upravlenii proizvodstvom* [Mathematical models in production management]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 616 p.
2. Khachatryan S. R. *Prikladnye metody matematicheskogo modelirovaniya ekonomicheskikh sistem: nauchno-metodicheskoe posobie* [Applied methods of mathematical modeling of economic systems: scientific and methodological guide]. Moscow, Ekzamen Publ., 2002, 192 p.
3. Hunk D. E., Wichern D. W., Rights A. J. *Biznes-prognozirovanie* [Business forecasting]. Transl. from English. 7th edition. Moscow, Vil'yams Publ., 2003, 656 p.

4. Fogler H. R. A pattern recognition model for forecasting. *Management science*, 1974, vol.20, no.8, pp.1178-1189. DOI: 10.1287/mnsc.20.8.1178.
5. Chetyrkin E. M. *Statisticheskie metody prognozirovaniya* [Statistical forecasting methods]. 2nd edition, rev. and add. Moscow, *Statistika* Publ., 1977, 200 p.
6. Zhu J., Hong J., Hughes J. G. Using Markov chains for link prediction in adaptive web sites. Proceedings of the 1st International Conference on Computing in an Imperfect World. UK, London, 2002, pp.60-73. DOI: 10.1007/3-540-46019-5\_5.
7. Box J., Jenkins G. M. *Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie* [Time series analysis, forecast and management]. Moscow, *Mir* Publ., 1974, 406 p.
8. Singh S. Pattern modelling in time-series forecasting. *Cybernetics and Systems. International Journal*, 2000, vol.31, no.1, pp.49-65. DOI: 10.1080/019697200124919.
9. Borisov P. A., Vinogradov G. P., Semenov N. A. Integration of neural network algorithms, nonlinear dynamics models, and fuzzy logic methods in forecasting problems. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2008, no.1, pp.78-84 (in Russian).
10. Staroverov B. A., Izotov V. A., Mormylev M. A. Operating forecasting accuracy increasing of electrical energy consumption by means of neural networks at the expense of daily diagrams approximation and classification processes uniting. *Vestnik IGEU*, 2007, iss.4, pp.91-93 (in Russian).
11. Filik U. B., Kurban M. A new approach for the short-term load forecasting with autoregressive and artificial neural network models. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2007, no.3, pp.66-71. DOI: 10.5019/j.ijcir.2007.88.
12. Emelyanov A. A., Vlasova E. A., Duma R. V. *Imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov: uchebnoe posobie* [Simulation modeling of economic processes: textbook]. Moscow, *Finansy i statistika* Publ., 2014, 416 p.
13. Albrecht E. G. *O dinamicheskikh modelyakh makroekonomiki. Informatsionnye tekhnologii v ekonomike: teoriya, modeli i metody: sb. nauch. tr.* [On dynamic models of macroeconomics. Information technologies in economics: theory, models and methods. Collection of scientific papers]. Yekaterinburg, USUE Publ., 2005, pp.3-17.
14. Aksyonov K., Bykov E., Aksyonova O., Goncharova N., Nevolina A. Analysis of simulation modeling systems illustrated with the problem of model design for the subject of technological logistics (WIP). Society for Modeling & Simulation International (SCS). 2015 Summer Simulation Multi-Conference (SummerSim'15). Chicago, USA, 26–29 July, 2015, Simulation Series, vol.47, iss.10, pp.345-348.
15. Babenko V. O. Modelling of factors affecting innovational agricultural activity of enterprises AIC in Ukraine. *Scientific bulletin Polesie*, 2017, no.1(9), pp.115-121. DOI: 10.25140/2410-9576-2017-2-2(10).
16. Shiryayev V. I., Shiryayev E. V. *Prinyatie reshenii: Prognozirovanie v global'nykh sistemakh: uchebnoe posobie* [Decision making: Forecasting in global systems: tutorial]. Moscow, *Knizhnyi dom «LIBROKOM»* Publ., 2010, 176 p.
17. Shorikov A. F. *Metodologiya modelirovaniya mnogourovnevnykh sistem: ierarkhiya i dinamika* [Methodology for modeling multilevel systems: hierarchy and dynamics]. *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2006, no.1(1), pp.136-141.
18. Krasovskii N. N. *Teoriya upravleniya dvizheniem* [Theory of motion control]. Moscow, *Nauka* Publ., 1968, 476 p.
19. Krasovskii N. N., Subbotin A. I. *Pozitsionnye differentsial'nye igry* [Positional differential games]. Moscow, *Nauka* Publ., 1974, 456 p.
20. Shorikov A. F. Minimaksnoe otsenivanie i upravlenie v diskretnykh dinamicheskikh sistemakh [Minimax estimation and control in discrete-time dynamical systems]. Yekaterinburg, USUE Publ., 1997, 242 p.
21. Tyulyukin V. A., Shorikov A. F. *Ob odnom algoritme postroyeniya oblasti dostizhimosti lineinoi upravlyaemoi sistemy* [On one algorithm for constructing the reachable set of a linear control system]. *Negladkie zadachi optimizatsii i upravlenie*. Sverdlovsk, Ural Branch of the USSR Academy of Science, 1988, pp.55-61.
22. Shorikov A. F., Rassadina E. S. Dynamic optimization of complex program controlling the structure of an enterprise's product range. *Ekonomika regiona=Economy of the Regions*, 2012, no.3(31), pp.261-271 (in Russian). DOI: 10.17059/2012-3-26.
23. Shorikov A. F., Rassadina E. S. Dynamic optimization of the complex adaptive controlling by the structure of enterprise's product range. *Ekonomika regiona=Economy of the Regions*, 2013, no.2(34), pp.176-184 (in Russian). DOI: 10.17059/2013-2-19.
24. Bazaraa M. S., Shetty C. M. *Nelineinoe programmirovaniye. Teoriya i algoritmy* [Nonlinear programming: Theory and algorithms]. Moscow, *Mir* Publ., 1984, 583 p.

### **About the author**

*Andrey F. Shorikov*, ORCID 0000-0003-1255-0862, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Leading Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of the RAS; Leading Researcher, N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia, afshorikov@mail.ru

### **Acknowledgment**

The work was carried out with financial support by the Russian Science Foundation (Project No. 22-28-01868 "Development of an agent-based model of the network industrial complex in the context of digital transformation").

Received 19.05.2022, reviewed 03.06.2022, accepted 20.06.2022

# Решение обратной задачи кинематики для последовательных роботов- манипуляторов на основе нечетких численных методов

*В. В. Борисов<sup>1</sup>, А. М. Соколов<sup>1\*</sup>, А. П. Жарков<sup>1</sup>, О. П. Култыгин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> Университет «Синергия», Москва, Россия

\* *andreisokol98@gmail.com*

**Аннотация.** В настоящее время внедрение робототехнических систем является одной из распространенных форм автоматизации технологических операций в различных сферах человеческой деятельности. Среди робототехнических систем особое место занимают последовательные многозвенные роботы-манипуляторы (ПРМ), получившие широкое распространение из-за сравнительно малых габаритов и высокой маневренности, что делает их применение незаменимым при решении различных прикладных задач. На практике на эффективность функционирования ПРМ могут оказывать влияние факторы неопределенности различного типа, обусловленные воздействием внешней среды. Среди внешних факторов может быть выделена группа, влияние которой характеризуется неопределенностью при идентификации точного положения целевой точки позиционирования захвата. К таким факторам, в первую очередь, могут быть отнесены воздействия, влияющие на системы технического зрения. Данная проблема особенно актуальна для мобильных роботов специального назначения, работающих в агрессивных условиях внешней среды. Похожая на описанную ситуация также возникает при функционировании медицинского робота-манипулятора в момент проведения малоинвазивных вмешательств, когда роль системы управления и наблюдения берет на себя человек-оператор. В этой связи организация эффективного управления в условиях воздействия факторов неопределенности, препятствующих корректному распознаванию целевого положения рабочего органа ПРМ, является актуальной проблемой. Авторами статьи рассматривается решение обратной задачи кинематики для ПРМ на основе применения нечетких реализаций численных методов с учетом возможного возникновения в процессе решения вырожденных конфигураций звеньев манипулятора.

**Ключевые слова:** последовательный робот-манипулятор, управление, нечеткий численный метод, обратная задача кинематики

**Для цитирования:** *Борисов В. В., Соколов А. М., Жарков А. П., Култыгин О. П.* Решение обратной задачи кинематики для последовательных роботов-манипуляторов на основе нечетких численных методов // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 113–126. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-113-126

# Solving the inverse kinematics problem for sequential robot manipulators based on fuzzy numerical methods

V. Borisov<sup>1</sup>, A. Sokolov<sup>1\*</sup>, A. Zharkov<sup>1</sup>, O. Kultygin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research University "MPEI", Moscow, Russia

<sup>2</sup> Synergy University, Moscow, Russia

\* andreisokol98@gmail.com

**Abstract.** Nowadays the introduction of robotic systems is one of the most common forms of the technological operations automation in various spheres of human activity. Among the robotic systems a special place is occupied by sequential multi-link robotic manipulators (SRM). SRM have become widespread due to relatively small dimensions and high maneuverability, which makes their use indispensable to solve various tasks. In practice, the effectiveness of the functioning of the SRM can be influenced by various types of external environment fuzzy factors. Among the external factors there is a group affecting the ability to determine the exact target position. Such factors often affect technical vision systems. This problem is especially relevant for special purpose mobile robots operating in aggressive environmental conditions. A situation similar to the described one also occurs when a medical robot manipulator is used for minimally invasive surgery, when the role of the control and monitoring system is assumed by an operator. In this regard, the organization of effective control taking into account influence of the external fuzzy factors, that prevent the correct recognition of the target position of the SRM instrument, is an urgent problem. The authors consider the solution of the inverse kinematics problem for SRM based on the use of fuzzy numerical methods, taking into account the possible occurrence of singular configurations in the process of solving.

**Keywords:** sequential robot manipulator, control, fuzzy numerical method, inverse kinematics problem

**For citation:** Borisov V., Sokolov A., Zharkov A., Kultygin O. Solving the inverse kinematics problem for sequential robot manipulators based on fuzzy numerical methods. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.113-126 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-113-126

## Введение

В настоящее время робототехнические системы получили широкое распространение в различных сферах человеческой деятельности. Они широко используются при автоматизации высокотехнологичных производств в различных отраслях промышленности, применяются в перспективных образцах специальной военной техники и в сферах, в которых непосредственное участие человека затруднено. Направление исследований в области робототехники в последние годы является одним из основных направлений инновационного развития страны [1–5].

Особое место среди робототехнических устройств занимают многосвязные последовательные роботы-манипуляторы (ПРМ), представляющие собой цепочку соединенных последовательно звеньев, завершаемую рабочим органом в виде предназначенного для проведения требуемых манипуляций инструмента. Данные роботы обладают сравнительно небольшими габаритами и высокой маневренностью, что делает возможным их применение при решении широкого класса технологических задач.

На практике при управлении ПРМ могут возникать ситуации, в которых невозможно точно определить положения целевой точки

позиционирования его рабочего органа в пространстве. В качестве примера может рассматриваться воздействие внешних факторов на навигационные и оптические системы мобильных роботов-манипуляторов, применяемых в перспективных образцах специальной роботизированной техники и функционирующих автономно в неконтролируемой окружающей среде [6]. К данным факторам могут быть отнесены как естественные загрязнения оптических приборов, так и наличие задымлений, препятствующих нормальному распознаванию системой наблюдения визуальных образов. Сложности с определением точного желаемого положения захвата могут также возникать в случаях непосредственного выполнения человеком-оператором роли системы видения и управления. Подобные ситуации характерны при использовании ПРМ в качестве средств для дистанционного взаимодействия с опасными для человека веществами в химической и биологической промышленности, а также в роботизированной хирургии при проведении инвазивных вмешательств с помощью телеманипулятора, обладающего ограниченными средствами обзора и уменьшенной зоной маневрирования медицинского инструмента [7–9]. Учет влияния данных факторов возможен на основе применения элементов теории нечетких множеств [10–12].

Одной из ключевых задач, которую необходимо решить для организации управления ПРМ, является обратная задача кинематики (ОЗК). Данная задача заключается в определении конфигурации звеньев манипулятора, соответствующей заданной точке пространства.

Получение аналитического решения ОЗК в явном виде возможно только для ПРМ, обладающих простой конструкцией или кинематической структурой специального вида, удовлетворяющей одному из двух условий: оси трех смежных сочленений должны быть параллельны друг другу либо пересекаться в одной точке. Для манипуляторов с произ-

вольной сложной кинематической структурой, которая не удовлетворяет указанным выше требованиям, получение обобщенных координат в явном виде является нетривиальной задачей в следствие нелинейности решаемых уравнений. В этой связи часто применяется решение ОЗК на основе численных алгоритмов. Данный вариант предполагает поиск приближенного решения с заданной точностью посредством итерационного приближения и отличается своей универсальностью при рассмотрении ПРМ с различными кинематическими схемами.

Среди численных алгоритмов решения ОЗК наибольшее распространение получили методы второго порядка, которые при прочих равных условиях обладают наивысшей скоростью сходимости. В основе данных методов заложено вычисление обратной матрицы Якоби.

На практике при реализации численного решения ОЗК возможно возникновение ситуаций, когда на очередной итерации значениям обобщенных координат, задающим определенную конфигурацию звеньев ПРМ, соответствует плохо обусловленная матрица Якоби [13]. В этом случае определение в явном виде обратной матрицы невозможно, что приводит к вынужденной остановке вычислений алгоритма. Такие конфигурации ПРМ называются вырожденными и в общем случае соответствуют позициям инструмента рабочего органа на границах зоны обслуживания [14].

В этой связи разработка численных методов решения ОЗК в случае воздействия на ПРМ факторов неопределенности внешней среды с учетом вырожденных конфигураций является актуальной задачей.

## Описание прямой кинематики манипулятора

Положение ПРМ в пространстве характеризуется вектором обобщенных координат  $\vec{q} = (q_0, q_1, \dots, q_N)^T$ , который в случае угловой

системы представляет собой вектор присоединенных углов. Положение рабочего органа в пространстве определяется вектором  $\vec{k} = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi)^T$ , где тройки компонент  $(x, y, z)$  и  $(\varphi, \theta, \psi)$  являются линейными и угловыми координатами соответственно.

Для описания системы управления ПРМ требуется решить прямую и обратную задачи кинематики.

Целью решения прямой задачи кинематики (ПЗК) является определение пространственного положения  $\vec{k}$  рабочего органа ПРМ в абсолютной системе по известным обобщенным координатам  $\vec{q}$  для заданной кинематической структуры ПРМ.

Взаимная ориентация абсолютной системы и системы рабочего органа ( $N$ -е звено) определяется тремя линейными и тремя угловыми координатами. Таким образом, связь между векторами, описывающими положение рабочего органа ПРМ в указанных системах координат, может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\vec{k}^0 = T_N^0 \times \vec{k}^N, \quad (1)$$

где  $\vec{k}^0$  – вектор положения точки в абсолютной системе координат;

$\vec{k}^N$  – вектор положения точки в системе координат  $N$ -го звена;

$T_N^0$  – однородная матрица преобразований, определяющая линейное и угловое смещение одной системы координат относительно другой.

Однородная матрица преобразований имеет вид

$$T_N^0 = \begin{bmatrix} h_x & s_x & t_x & p_x \\ h_y & s_y & t_y & p_y \\ h_z & s_z & t_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{h}_N^0 & \vec{s}_N^0 & \vec{t}_N^0 & \vec{p}_N^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_N^0 & \vec{P}_N^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где вектор  $\vec{p}_N^0$  и матрица вращения  $R_N^0$  определяют линейное смещение начала координат и вращение системы  $N$ -го звена относительно

абсолютной системы координат соответственно.

Матрица преобразований положения рабочего органа ПРМ из связанной с его звеном системы координат в абсолютную может быть представлена как произведение матриц последовательных преобразований систем координат звеньев:

$$T_N^0(\vec{q}) = T_1^0(q_1) \times T_2^1(q_2) \times \dots \times T_N^{N-1}(q_N) = \prod_{i=1}^N T_i^{i-1}(q_i), \quad (3)$$

где  $T_i^{i-1}$  – матрица преобразования координаты точки из  $i$  в  $i-1$  систему координат;

$q_i$  –  $i$ -я компонента вектора обобщенных координат, описывающая перемещение  $i$ -го звена относительно предыдущего.

Стоит отметить, что на практике часто для сокращения количества параметров, необходимых для описания положения текущего звена относительно системы координат предыдущего, с шести  $(x, y, z, \varphi, \theta, \psi)$  до четырех  $(d, \theta, r, \alpha)$  применяется матричный метод Денавита – Хартенберга, который определяет правила последовательного построения систем координат звеньев ПРМ.

При использовании для описания кинематической структуры ПРМ системы представления Денавита – Хартенберга матрица преобразования от  $i$  к  $i-1$  системе координат может быть определена в соответствии с выражением

$$T_i^{i-1}(q_i) = T_{z,\theta_i} \times T_{z,d_i} \times T_{x,r_i} \times T_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} R_{z,\theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & p_{d_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & p_{r_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x,\alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $R_{z,\theta_i}$  – базовая матрица поворота относительно оси  $OZ$  на угол  $\theta_i$ ;

$R_{x,\alpha_i}$  – базовая матрица поворота относительно оси  $OX$  на угол  $\alpha_i$ ;

$p_{d_i} = [0 \ 0 \ d]^T$  и  $p_{r_i} = [r \ 0 \ 0]^T$  – векторы линейного смещения вдоль оси  $OZ$  и  $OX$  соответственно;

$E$  – единичная матрица.

Таким образом, для решения ПЗК необходимо определить  $N$  однородных матриц преобразований (4), соответствующих звеньям ПРМ, и, подставив текущие значения обобщенных координат, найти их произведение в соответствии с выражением (3). В результате будет получена итоговая матрица (2), содержащая в явном виде значения линейных перемещений начала системы координат рабочего органа вдоль осей абсолютной системы координат  $\vec{p}_N^0$ , которые соответствуют первым трем компонентам искомого вектора  $\vec{k}^0$ , а также информацию о поворотах системы координат рабочего органа в виде матрицы вращения  $R_N^0$ . Угловые координаты в явном виде могут быть получены из матрицы вращения с помощью одного из известных способов ее параметризации с помощью трех чисел, в качестве которых на практике наиболее часто применяются углы Эйлера.

Решение ПЗК однозначно для любого вектора обобщенных координат и, как правило, не представляет сложности с аналитической и математической точки зрения, так как применяемые методы хорошо обоснованы и проработаны.

### Решение обратной задачи кинематики

Как уже было отмечено ранее, целью решения обратной задачи кинематики (ОЗК) является определение вектора обобщенных координат  $\vec{q}$ , задающего конфигурацию манипулятора, которая обеспечивает заданное пространственное положение  $\vec{k}^0$  рабочего органа ПРМ.

Вектор  $\vec{k}^0$ , описывающий положение рабочего органа в абсолютной системе координат, может быть представлен в виде однородной матрицы преобразований  $T^*$  с известными элементами, в которой вектор  $\vec{p}_N^0$  будет со-

впадать с тремя первыми компонентами  $\vec{k}^0$ , а матрица вращения  $R_N^0$  зависеть от принятой системы последовательных базовых поворотов. В случае представления угловых перемещений в виде углов Эйлера матрица вращения может быть получена в соответствии с выражением

$$R_N^0 = R_{z,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\psi},$$

где  $R_{z,\varphi}$ ,  $R_{y,\theta}$  и  $R_{z,\psi}$  – базовые матрицы поворотов относительно осей  $OZ$ ,  $OX$  и  $OZ$  на углы  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  соответственно.

В общем виде численное решение ОЗК сводится к решению задачи минимизации целевой векторной функции, которая представляет собой квадрат нормы вектора невязки текущего и требуемого положения рабочего органа ПРМ:

$$F(\vec{q}) = \|\Phi(\vec{q}) - \vec{k}\|^2 \rightarrow \min_{q \in R^{N+1}}.$$

В основе методов второго порядка заложено вычисление матрицы Якоби, которая в общем виде может быть записана как

$$J(\vec{q}) = \frac{\partial F(\vec{q})}{\partial q_i} = \frac{\partial T_N^0(\vec{q})}{\partial q_i} = \left\{ \frac{\partial T_{Nj}^0(\vec{q})}{\partial q_i}, j = 0 \dots 5 \right\}, i = 0 \dots N.$$

С учетом формулы (3) выражения для расчета значений элементов  $i$ -го столбца матрицы Якоби могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial T_N^0(\vec{q})}{\partial q_i} = \frac{\partial T_i^{i-1}(q_i)}{\partial q_i} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_j^{j-1}(q_j).$$

Для численного решения ОЗК может применяться метод Гаусса – Ньютона, допускающий использование прямоугольной матрицы Якоби. Данное обстоятельство особенно важно при рассмотрении кинематики избыточных манипуляторов, число степеней подвижности которых превышает размерность вектора обобщенных координат.

Вычислительный алгоритм метода Гаусса – Ньютона имеет вид [15]

$$\vec{q}^{[i+1]} = \vec{q}^{[i]} - \alpha_i \times J^+ (\vec{q}^{[i]}) \times F(\vec{q}^{[i]}), \quad (5)$$

где  $\vec{q}^{[i]}$  и  $\vec{q}^{[i+1]}$  – значения вектора обобщенных координат на  $i$  и  $i+1$  итерациях;

$J^+ (\vec{q}^{[i]})$  – значение правой псевдообратной матрицы Якоби на  $i$ -й итерации;

$\alpha_i \in (0, 1]$  – величина шага алгоритма на  $i$ -й итерации.

Правая псевдообратная матрица может быть найдена в соответствии с выражением

$$J_n^+ = (J^T \times J)^{-1} \times J^T.$$

Как отмечалось ранее, при реализации численного решения ОЗК, в том числе с использованием метода Гаусса – Ньютона, возможно возникновение ситуаций, когда на очередной итерации значениям обобщенных координат, задающим определенную конфигурацию звеньев ПРМ, соответствует плохо обусловленная матрица Якоби. В этом случае определение в явном виде обратной матрицы невозможно, что приводит к вынужденной остановке вычислений алгоритма. Такие конфигурации ПРМ называются вырожденными

и в общем случае соответствуют позициям инструмента рабочего органа на границах зоны обслуживания.

На рисунке 1 на примере промышленного ПРМ KUKA KR 360 R2830 показана область позиционирования рабочего органа ПРМ, для которой потенциально возможно установление вырожденных конфигураций.

Для нахождения обратной матрицы в случае установления звеньев манипулятора в вырожденных конфигурациях может быть применена двухэтапная процедура. На первом этапе осуществляется ранговая факторизация исходной матрицы Якоби, которая заключается в ее представлении в виде двух невырожденных матриц:

$$J = A \times B,$$

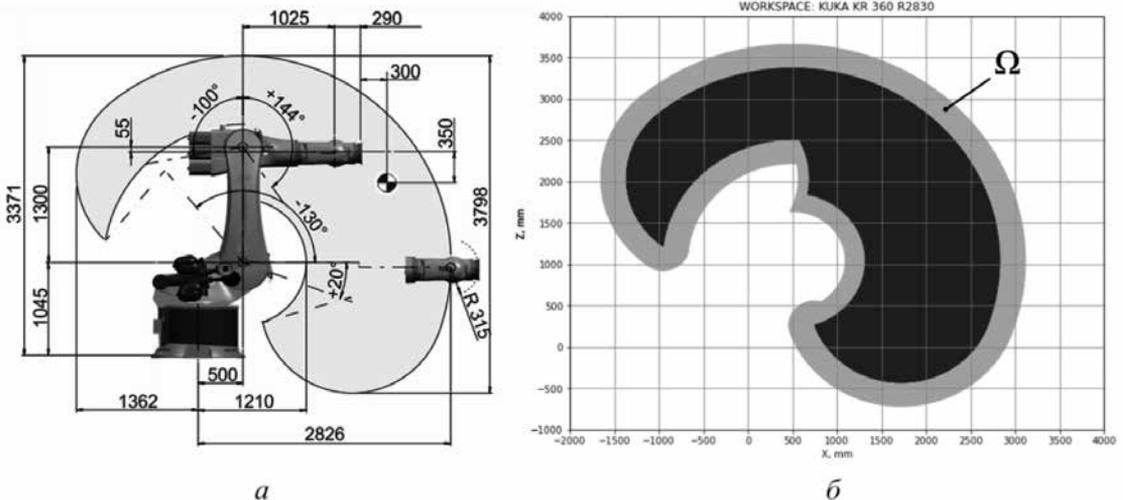
где  $J$  – вырожденная матрица Якоби, в общем случае размером  $m \times n$  и рангом  $r$ ;

$A$  – матрица  $m \times r$  ранга  $r$ ;

$B$  – матрица  $r \times n$  ранга  $r$ .

На втором этапе осуществляется поиск псевдообратных матриц.

Еще одним известным вариантом решения проблемы, связанной с наличием вы-



**Рис. 1.** Вид зоны обслуживания манипулятора КУКА KR 360 R2830: а – без учета инструмента рабочего органа; б – с учетом инструмента рабочего органа ( $\Omega$  – область позиционирования, соответствующая потенциальному установлению вырожденных конфигураций)

**Fig. 1.** View of the service area of the KUKA KR 360 R2830 manipulator: a – without taking into account the tool of the working body; b – taking into account the tool of the working body ( $\Omega$  is the positioning area corresponding to the potential establishment of degenerate configurations)

рожденных конфигураций манипулятора, является применение итерационного метода Левенберга – Марквардта, который представляет собой комбинацию методов Гаусса – Ньютона и градиентного спуска. Указанная комбинация методов достигается за счет заложенной в основе вычисления правой и левой псевдообратных матриц Якоби процедуры регуляризации [16]:

$$J_n^+ = (J^T \times J + \lambda E)^{-1} \times J^T,$$

$$J_n^+ = J^T \times (J^T \times J + \lambda E)^{-1},$$

где  $\lambda$  – параметр Левенберга – Марквардта;  $E$  – единичная матрица.

С учетом формулы расчета правой псевдообратной матрицы выражение для определения значений вектора обобщенных координат на очередной итерации может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{q}^{[i+1]} = \vec{q}^{[i]} - \alpha_i \times \left[ \left( J(\vec{q}^{[i]})^T \times J(\vec{q}^{[i]}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \lambda E \right)^{-1} \times J(\vec{q}^{[i]})^T \right] \times F(\vec{q}^{[i]}). \end{aligned} \quad (7)$$

В выражении (7) параметр Левенберга – Марквардта  $\lambda$  отвечает за баланс между глобальной сходимостью и общей скоростью сходимости алгоритма. При  $\lambda = 0$  (7) принимает вид, соответствующий формуле алгоритма Гаусса – Ньютона (5), обеспечивающего высокую скорость сходимости. При значениях  $\lambda \gg 1$  формула (7) близка к реализации метода градиентного спуска с малым шагом, обладающего свойством глобальной сходимости. С учетом вышесказанного для достижения максимальной эффективности при решении ОЗК необходимо выбирать значение  $\lambda$  из интервала (0, 1], при этом для определения оптимального значения данного параметра могут применяться различные специальные способы [16].

Важной особенностью метода Левенберга – Марквардта является способность алгоритма на его основе продолжать вычисления даже при плохой обусловленности матрицы ( $J^T \times J$ ), что обеспечивает его работоспособность в случае вырожденных конфигураций.

## Нечеткая реализация метода Левенберга – Марквардта

В случае отсутствия возможности определения точного целевого положения рабочего органа ПРМ для описания его пространственного положения может применяться представление его линейных и угловых координат в виде нечетких чисел.

В данном случае в общем виде решение ОЗК может быть записано в виде выражения [17]

$$\tilde{\mathbf{q}} = \tilde{\Phi}^{-1}(\tilde{\mathbf{k}}).$$

Целевая функция для поиска численного решения примет вид

$$\tilde{F}(\tilde{\mathbf{q}}) = \left\| \tilde{\Phi}(\tilde{\mathbf{q}}) - \tilde{\mathbf{k}} \right\|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{q} \in R^{N+1}}.$$

Ранее в статье авторов [18] было рассмотрено применение нечеткой реализации итерационного метода Гаусса – Ньютона для поиска решения ОЗК последовательного манипулятора в случае, когда точное определение целевого положения позиционирования захвата не может быть определено и его координаты описываются в виде чисел с треугольными функциями принадлежности. Однако в данной работе рассматривалось решение ОЗК только для обеспечения заданных линейных координат позиционирования рабочего органа ПРМ без учета угловой ориентации, что в общем случае не дает полного представления о его положении в пространстве. Также в данной работе не были рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением решения ОЗК для конфигураций звеньев манипулятора, которым соответствует вырожденная матрица Якоби, что, в свою очередь, в общем случае приводит к невозможности продолжения вычислений в соответствии с выбранным численным алгоритмом без применения специальных методов [19].

Общий алгоритм метода Левенберга – Марквардта при определении конечной точки в виде вектора нечетких чисел будет иметь следующий вид [17]:

$$\tilde{\mathbf{q}}^{[i+1]} = \tilde{\mathbf{q}}^{[i]} - \alpha_i \times \left[ \left( \tilde{\mathcal{J}}(\tilde{\mathbf{q}}^{[i]})^T \times \tilde{\mathcal{J}}(\tilde{\mathbf{q}}^{[i]}) + \lambda E \right)^{-1} \times \tilde{\mathcal{J}}(\tilde{\mathbf{q}}^{[i]})^T \right] \times \tilde{F}(\tilde{\mathbf{q}}^{[i]}).$$

Выражение для вычисления матрицы Якоби:

$$\tilde{\mathcal{J}}(\tilde{\mathbf{q}}) = \left\{ \frac{\partial \tilde{F}_j(\tilde{\mathbf{q}})}{\partial q_i}, j = 0 \dots 5, i = 0 \dots N \right\}.$$

Выражение для вычисления правой псевдообратной матрицы Якоби:

$$\tilde{\mathcal{J}}_n^+ = (\tilde{\mathcal{J}}^T \times \tilde{\mathcal{J}})^{-1} \times \tilde{\mathcal{J}}^T.$$

Критерий останова может быть записан в виде

$$\left| \tilde{\mathbf{q}}^{[i+1]} - \tilde{\mathbf{q}}^{[i]} \right| < \varepsilon, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – четкое значение, задающее точность вычисления.

В формуле (8) для вычисления расстояний между соответствующими нечеткими компонентами векторов обобщенных координат предлагается применение псевдометрики Евклида [18].

## Программная реализация

Для программной реализации модели манипулятора *KUKA KR 360 R2830*, а также описанных нечетких методов решения ОЗК применялся язык программирования *Python*. Сильной стороной данного языка является наличие гибкого и продуманного механизма реализации объектно-ориентированного подхода к написанию кода, что позволяет значительно упростить процесс проектирования и поддержки сложных программных комплексов, а также моделирования функционирования физических объектов, имеющих сложную иерархическую структуру, таких как робот-манипулятор. Также важным преимуществом языка *Python* является наличие большого числа сторонних расширений и библиотек с от-

крытым исходным кодом, предназначенных для решения широкого класса задач. Так, например, для математического описания кинематики манипулятора применялась библиотека *numpy*, которая предоставляет поддержку векторных и матричных операций, а также функции для работы с многомерными массивами. Данная библиотека реализована на языке C, что положительно сказывается на общей скорости выполнения вычислений.

В листинге 1 приведен код реализации функции вычисления псевдообратной матрицы на основе рангового разложения исходной матрицы.

**Листинг 1.** Функция вычисления псевдообратной матрицы на основе рангового разложения исходной матрицы

**Listing 1.** Function to calculate a pseudo-inverse matrix based on the rank decomposition of the initial matrix

```
import numpy as np

def find_inverse(matrix) -> np.array:
    """Calculate inverse or pseudo-
    inverse matrix."""
    h, w = matrix.shape
    rank = np.linalg.matrix_rank(matrix)
    if h == rank == w:
        return np.linalg.inv(matrix)
    elif h == rank < w:
        return (matrix.T).dot(np.linalg.
        inv(matrix.dot(matrix.T)))
    elif w == rank < h:
        return np.linalg.inv((matrix.T).
        dot(matrix)).dot(matrix.T)
    else: # Singular
        # Find linear independent rows
        right = matrix[1]
        for row in matrix[1:]:
            right = np.vstack((right, row))
            if np.linalg.matrix_rank(right)
        < len(right):
            right = right[:-1]
        right_inv = find_inverse(right)
        left = matrix.dot(right_inv)
        left_inv = find_inverse(left)
        return right_inv.dot(left_inv)
```

Приведенный в листинге 1 программный код иллюстрирует процедуру вычисления псевдообратной матрицы в зависимости от значения ранга и соотношения размеров исходной матрицы, применяемый для учета вырожденных конфигураций ПРМ при реализации решения ОЗК с помощью метода Гаусса – Ньютона. В случае плохой обусловленности исходной матрицы применяется ранее описанная процедура ранговой факторизации. Приведенный код включает использование функций библиотеки *numpy*, что предполагает проведение операций только с четкими значениями. Однако алгоритм реализации функции может быть обобщен для случая, когда элементами исходной матрицы являются нечеткие числа.

### Результаты вычислительного эксперимента

Для проверки корректности полученных выражений и подтверждения эффективности предложенной нечеткой реализации метода Левенберга – Марквардта проведено ее сравнение с предложенной в предыдущей работе авторов нечеткой реализацией метода Гаусса –

Ньютона. При этом для проверки качества определения обратной матрицы Якоби для вырожденных конфигураций целевые точки позиционирования выбирались на границе рабочей зоны.

Моделирование выполнено на примере построения модели управления для уже упомянутого ранее шестизвенного ПРМ *KUKA KR 360 R2830*.

В таблице 1 приведены результаты сравнения быстродействия нечетких реализаций методов Гаусса – Ньютона и Левенберга – Марквардта при выполнении операций вблизи и на удалении от границ рабочей зоны.

Из таблицы 1 видно, что при нахождении исходной точки и целевой области позиционирования ближе к центру рабочей зоны быстродействие алгоритмов отличается незначительно. Однако при рассмотрении перемещений рабочего органа вдоль границы рабочей зоны метод Левенберга – Марквардта показывает лучший результат в среднем на 12%. Данное обстоятельство связано с тем, что при использовании нечеткой реализации метода Гаусса – Ньютона для учета вырожденных конфигураций ПРМ выполняются дополнительные вычислительные процедуры.

**Таблица 1.** Сравнение быстродействия нечетких реализаций метода Гаусса – Ньютона и Левенберга – Марквардта в различных условиях

**Table 1.** Comparison of the performance of fuzzy Gauss – Newton and fuzzy Levenberg – Marquardt method under various conditions

№ No.	Центральные точки рабочей зоны <i>Working area central points</i>		Краевые точки рабочей зоны <i>Working area border points</i>	
	Быстродействие нечеткого метода Гаусса – Ньютона, мс <i>Fuzzy Gauss – Newton method performance, ms</i>	Быстродействие нечеткого метода Левенберга – Марквардта, мс <i>Fuzzy Levenberg – Marquardt method performance, ms</i>	Быстродействие нечеткого метода Гаусса – Ньютона, мс <i>Fuzzy Gauss – Newton method performance, ms</i>	Быстродействие нечеткого метода Левенберга – Марквардта, мс <i>Fuzzy Levenberg – Marquardt method performance, ms</i>
1	324	330	272	228
2	338	304	335	279
3	233	229	410	330
4	179	168	296	219

№ No.	Центральные точки рабочей зоны <i>Working area central points</i>		Краевые точки рабочей зоны <i>Working area border points</i>	
	Быстродействие нечеткого метода Гаусса – Ньютона, мс <i>Fuzzy Gauss – Newton method performance, ms</i>	Быстродействие нечеткого метода Левенберга – Марквардта, мс <i>Fuzzy Levenberg – Marquardt method performance, ms</i>	Быстродействие нечеткого метода Гаусса – Ньютона, мс <i>Fuzzy Gauss – Newton method performance, ms</i>	Быстродействие нечеткого метода Левенберга – Марквардта, мс <i>Fuzzy Levenberg – Marquardt method performance, ms</i>
5	327	324	443	334
6	323	345	349	266
7	368	347	304	311
8	243	202	345	302
9	196	178	397	333
10	220	233	291	248
11	344	317	381	349
12	381	351	355	322
13	238	265	330	317
14	236	236	375	352
15	215	204	265	248
16	178	193	267	225
17	127	148	206	183
18	166	174	264	267
19	191	185	468	440
20	135	155	351	328
Среднее <i>Average</i>	248,1	244,4	335,2	294,05

Стоит отметить, что для увеличения быстродействия алгоритма решения ОЗК целесообразно применение комбинированного подхода [18]. Данный подход предполагает использования нейросетевой модели для определения более близкого к целевому положению рабочего органа ПРМ начального приближения для численного алгоритма, что приводит к сокращению общего числа итераций [20, 21].

## Заключение

В статье было рассмотрено решение ОЗК для ПРМ в условиях воздействия факторов неопределенности внешней среды, влияю-

щих на возможность точного определения положения целевой точки позиционирования рабочего органа, которое в данном случае описывается с помощью вектора нечетких чисел. Особое внимание было уделено отработке алгоритмом численного метода вырожденных конфигураций звеньев ПРМ, характеризующихся плохо обусловленной матрицей Якоби и требующих использования специальных методов для продолжения итерационной процедуры.

Для решения описанной проблемы была предложена нечеткая реализация численного метода Левенберга – Марквардта, которая помимо прочего обладает устойчивостью к по-

явлению вырожденных конфигураций в процессе вычисления значений обобщенных координат на очередной итерации.

Проведено сравнение скорости получения решения ОЗК с заданной точностью при использовании предложенного метода по сравнению с разработанным ранее нечетким методом Гаусса – Ньютона на примере модели шестизвенового промышленного ПРМ *KUKA KR 360 R2830*. Для проверки качества обработки алгоритмом связанных с вырожденными конфигурациями ситуаций положение целевой точки позиционирования рабочего органа выбиралось как можно ближе к гра-

нице рабочей зоны. Результаты вычислительного эксперимента показали, что при применении нечеткого метода Левенберга – Марквардта скорость поиска решения увеличивается в среднем на 12%. Однако стоит отметить, что вычислительная реализация этого метода является более сложной по сравнению с нечеткой реализацией метода Гаусса – Ньютона, описанной ранее в работах авторов. В этой связи в случае выполнения ПРМ технологических операций внутри рабочей зоны на достаточном удалении от ее краев предпочтительным остается использование нечеткой реализации метода Гаусса – Ньютона.

### Список литературы

1. Дли М. И., Какатунова Т. В. Интеграция технопарка в инновационную структуру региона // Проблемы современной экономики. 2008. № 2. С. 252–254.
2. Курнышева И. П. Конкурентная политика в системе стратегического планирования // Современная конкуренция. 2020. Т. 14. № 3 (79). С. 28–40. DOI: 10.37791/1993-7598-2020-14-3-28-40.
3. Важенкина И. С., Важенкин С. Г. От конкуренции к конкурентному сотрудничеству: новая парадигма развития территорий // Современная конкуренция. 2021. Т. 15. № 4 (84). С. 5–20. DOI: 10.37791/2687-0657-2021-15-4-5-20.
4. Дли М. И., Какатунова Т. В. Управление инновационным потенциалом региона. – Смоленск: Смоленский ЦНТИ, 2008. – 146 с.
5. Горелова Т. П., Серебровская Т. Б. Цифровая трансформация логистического бизнеса // Современная конкуренция. 2022. Т. 16. № 2 (86). С. 101–112. DOI: 10.37791/2687-0657-2022-16-2-101-112.
6. Ram R., Pathak P., Junco S. Trajectory control of a mobile manipulator in the presence of base disturbance // SIMULATION. 2019. Vol. 95. No. 6. P. 529–543. DOI: 10.1177/0037549718784186.
7. Tian X., Xu Y. Low delay control algorithm of robot arm for minimally invasive medical surgery // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 93548–93560. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2995172.
8. Gupta S., Sarkar S. T., Kumar A. Kinematic control of an articulated minimally invasive surgical robotic arm // Proceedings of the 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853054.
9. Balatti P., Kanoulas D., Tsagarakis N., Ajoudan A. A method for autonomous robotic manipulation through exploratory interactions with uncertain environments // Autonomous Robots. 2020. Vol. 44. P. 1395–1410. DOI: 10.1007/s10514-020-09933-w.
10. Chen C.-Y., Her M.-G., Hung Y.-C., Karkoub M. Approximating a robot inverse kinematics solution using fuzzy logic tuned by genetic algorithms // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002. Vol. 20. P. 375–380. DOI: 10.1007/s001700200166.
11. Борисов В. В., Курилин С. П., Прокимов Н. Н., Черновалова М. В. Fuzzy cognitive modeling of heterogeneous electromechanical systems // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 1 (91). С. 32–39. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-1-32-39.
12. Борисов В. В., Курилин С. П., Луферов В. С. Нечеткие реляционные когнитивные темпоральные модели для анализа и прогнозирования состояния сложных технических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1 (97). С. 27–38. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-1-27-38.
13. Wang X., Zhang D., Zhao C., Zhang H., Yan H. Singularity analysis and treatment for a 7R 6-DOF painting robot with non-spherical wrist // Mechanism and Machine Theory. 2018. Vol. 126. P. 92–107. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.03.018.
14. Zhang X., Fan B., Wang C., Cheng X. Analysis of singular configuration of robotic manipulators // Electronics. 2021. No. 10 (18). Article 2189. DOI: 10.3390/electronics10182189.
15. Amirfakhrian M. An iterative Gauss – Newton method to solve an algebraic fuzzy equation with crisp coefficients // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2011. Vol. 22. No. 5–6. P. 207–216. DOI: 10.3233/IFS-2011-0483.

16. Vito D. D. Natale C., Antonelli G. A comparison of damped least squares algorithms for inverse kinematics of robot manipulators // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50. No. 1. P. 6869–6874. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1209.
17. Sulaiman I. M., Mamat M., Malik M., Nisar K. S., Elfasakhany A. Performance analysis of a modified Newton method for parameterized dual fuzzy nonlinear equations and its application // Results in Physics. 2022. Vol. 33. Article 105140. DOI: 10.1016/j.rinp.2021.105140.
18. Borisov V., Sokolov A., Lufarov V. Intelligent control for dual-purpose robot-manipulators based on combining neural network and fuzzy methods // Proceedings of the 10th International Conference on Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence (IMSC-2021). CEUR Workshop Proceedings, 2021. Vol. 2965. Article 20. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2965/paper20.pdf> (дата обращения: 01.07.2022).
19. Arefi R., Sadigh M. J. Fuzzy inverse kinematics algorithm for man and machine cooperation // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). 2011. P. 398–402. DOI: 10.1109/ICMECH.2011.5971318.
20. Meshalkin V. P., Puchkov A. Yu., Dli M. I., Lobaneva E. I. Deep neural networks application in models with complex technological objects. – In: Cyber-Physical systems: Advances in design & modelling / ed. by A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov. Studies in Systems, Decision and Control. – Springer, Cham., 2020. Vol. 259. P. 291–300. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4\_23.
21. Мешалкин В. П., Дли М. И., Пучков А. Ю., Лобанева Е. И. Предварительная оценка прагматической ценности информации в задаче классификации на основе глубоких нейронных сетей // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 3 (93). С. 9–20. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-3-9-20.

### Сведения об авторах

*Борисов Вадим Владимирович*, ORCID 0000-0001-7357-9365, докт. техн. наук, профессор, кафедра управления и интеллектуальных технологий, государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», Москва, Россия, [vbor67@mail.ru](mailto:vbor67@mail.ru)

*Соколов Андрей Максимович*, ORCID 0000-0003-1357-4807, магистрант, кафедра управления и интеллектуальных технологий, государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», Москва, Россия, [andreisokol98@gmail.com](mailto:andreisokol98@gmail.com)

*Жарков Антон Павлович*, ORCID 0000-0001-6362-9787, аспирант, кафедра управления и интеллектуальных технологий, государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», Москва, Россия, [antonzharkov@yandex.ru](mailto:antonzharkov@yandex.ru)

*Култыгин Олег Петрович*, ORCID 0000-0002-6519-1982, канд. экон. наук, доцент, департамент цифровой экономики, Университет «Синергия», Москва, Россия, [OKultygin@synergy.ru](mailto:OKultygin@synergy.ru)

### Поддержка исследований

Работа выполнена в рамках проекта «Методы и технологии интеллектуального управления многозвенными роботами-манипуляторами на основе нейронечетких моделей» (ПНИ 20/22-0000028/47) при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и IT» и «Технологии Индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020–2022 гг.

Статья поступила 19.07.2022, рассмотрена 04.08.2022, принята 18.08.2022

### References

1. Dli M. I., Kakatunova T. V. *Integratsiya tekhnoparka v innovatsionnuyu strukturu regiona* [Integration of the technopark into the innovative structure of the region]. *Problemy sovremennoi ekonomiki*=Problems of Modern Economics, 2008, no.2, pp.252-254.
2. Kurnisheva I. R Competitive policy in the strategic planning system. *Sovremennaya konkurentsia*=Journal of Modern Competition, 2020, vol.14, no.3(79), pp.28-40 (in Russian). DOI: 10.37791/1993-7598-2020-14-3-28-40.
3. Vazhenina I. S., Vazhenin S. G. From competition to competitive cooperation: new paradigm for territories development. *Sovremennaya konkurentsia*=Journal of Modern Competition, 2021, vol.15, no.4(84), pp.5-20 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0657-2021-15-4-5-20.
4. Dli M. I., Kakatunova T. V. *Upravlenie innovatsionnym potentsialom regiona* [Managing the innovative potential of the region]. Smolensk, *Smolenskii TsNTI* Publ., 2008, 146 p.

5. Gorelova T. P., Serebrovskaya T. B. Digital transformation of logistics business. *Sovremennaya konkurentsya*=Journal of Modern Competition, 2022, vol.16, no.2(86), pp.101-112 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0657-2022-16-2-101-112.
6. Ram R., Pathak P., Junco S. Trajectory control of a mobile manipulator in the presence of base disturbance. *SIMULATION*, 2019, vol.95, no.6, pp.529-543. DOI: 10.1177/0037549718784186.
7. Tian X., Xu Y. Low delay control algorithm of robot arm for minimally invasive medical surgery. *IEEE Access*, 2020, vol.8, pp.93548-93560. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2995172.
8. Gupta S., Sarkar S. T., Kumar A. Kinematic control of an articulated minimally invasive surgical robotic arm. *Proceedings of the 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp.1-5. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853054.
9. Balatti P., Kanoulas D., Tsagarakis N., Ajoudan A. A method for autonomous robotic manipulation through exploratory interactions with uncertain environments. *Autonomous Robots*, 2020, vol.44, pp.1395-1410. DOI: 10.1007/s10514-020-09933-w.
10. Chen C.-Y., Her M.-G., Hung Y.-C., Karkoub M. Approximating a robot inverse kinematics solution using fuzzy logic tuned by genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, vol.20, pp.375-380. DOI: 10.1007/s001700200166.
11. Borisov V., Kurilin S., Prokimmov N., Chernovalova M. Fuzzy cognitive modeling of heterogeneous electromechanical systems. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2021, vol.16, no.1(91), pp.32-39. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-1-32-39.
12. Borisov V., Kurilin S., Lufarov V. Fuzzy relational cognitive temporal models for analyzing and state prediction of complex technical systems. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.1(97), pp.27-38. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-1-27-38.
13. Wang X., Zhang D., Zhao C., Zhang H., Yan H. Singularity analysis and treatment for a 7R 6-DOF painting robot with non-spherical wrist. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, vol.126, pp.92-107. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.03.018.
14. Zhang X., Fan B., Wang C., Cheng X. Analysis of singular configuration of robotic manipulators. *Electronics*, 2021, no.10(18), article 2189. DOI: 10.3390/electronics10182189.
15. Amirfakhrian M. An iterative Gauss – Newton method to solve an algebraic fuzzy equation with crisp coefficients. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2011, vol.22, no.5-6, pp.207-216. DOI: 10.3233/IFS-2011-0483.
16. Vito D. D. Natale C., Antonelli G. A comparison of damped least squares algorithms for inverse kinematics of robot manipulators. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol.50, no.1, pp.6869-6874. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1209.
17. Sulaiman I. M., Mamat M., Malik M., Nisar K. S., Elfakhany A. Performance analysis of a modified Newton method for parameterized dual fuzzy nonlinear equations and its application. *Results in Physics*, 2022, vol.33, article 105140. DOI: 10.1016/j.rinp.2021.105140.
18. Borisov V., Sokolov A., Lufarov V. Intelligent control for dual-purpose robot-manipulators based on combining neural network and fuzzy methods. *Proceedings of the 10th International Conference on Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence (IMSC-2021)*. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, vol.2965, article 20. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2965/paper20.pdf> (accessed 01.07.2022).
19. Arefi R., Sadigh M. J. Fuzzy inverse kinematics algorithm for man and machine cooperation. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 2011, pp.398-402. DOI: 10.1109/ICMECH.2011.5971318.
20. Meshalkin V. P., Puchkov A. Yu., Dli M. I., Lobaneva E. I. Deep neural networks application in models with complex technological objects. In: *Cyber-Physical systems: Advances in design & modelling*. Ed. by A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham., 2020, vol.259, pp.291-300. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4\_23.
21. Meshalkin V. P., Dli M. I., Puchkov A. Yu., Lobaneva E. I. Preliminary assessment of the pragmatic value of information in the classification problem based on deep neural networks. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2021, vol.16, no.3(93), pp.9-20 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-3-9-20.

## About the authors

Vadim V. Borisov, ORCID 0000-0001-7357-9365, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Control and Intelligent Technologies Department, National Research University "MPEI", Moscow, Russia, vbor67@mail.ru

Andrey M. Sokolov, ORCID 0000-0003-1357-4807, Master's Student, Control and Intelligent Technologies Department, National Research University "MPEI", Moscow, Russia, andreisokol98@gmail.com

*Anton P. Zharkov*, ORCID 0000-0001-6362-9787, Postgraduate, Control and Intelligent Technologies Department, National Research University "MPEI", Moscow, Russia, antonzharckov@yandex.ru

*Oleg P. Kulygin*, ORCID 0000-0002-6519-1982, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Digital Economy Department, Synergy University, Moscow, Russia, OKulygin@synergy.ru

### **Acknowledgments**

The work was carried out within the framework of the project "Methods and technologies of the intelligent control for multilink robot-manipulators based on the neuro-fuzzy models" (PNI 20/22-0000028/47) with a support of the grant from the National Research University "MPEI" for the implementation of the scientific research programs "Power Engineering", "Electronics, Radio Engineering and IT" and "Technologies 4.0 for Industry and Robotics" in 2020-2022.

Received 19.07.2022, reviewed 04.08.2022, accepted 18.08.2022

# Моделирование зависимости обменного курса рубля от цен на нефть с использованием нейронных сетей

А. В. Полбин<sup>1,2</sup>, М. А. Кропочева<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт экономической политики им. Е. Т. Гайдара, Москва, Россия

\* *kropocheva-ma@ranepa.ru*

**Аннотация.** Данная статья посвящена исследованию зависимости обменного курса рубля от цен на нефть с использованием нейросетевого моделирования. Актуальность исследования подтверждается заинтересованностью органов денежно-кредитного регулирования в моделировании динамики обменного курса при выработке мер денежно-кредитной политики. К поставленным задачам относятся оценка взаимосвязи между обменным курсом рубля и ценами на нефть посредством многослойного перцептрона и рекуррентной нейронной сети, а также оценка влияния дополнительных факторов – валютных интервенций и геополитических рисков – на связь между исследуемыми переменными. По результатам исследования, применение нейронных сетей позволило с достаточной точностью оценить целевую переменную. Кроме того, было подтверждено ослабление зависимости между рассматриваемыми переменными в периоды проведения валютных интервенций и в условиях высокой геополитической нестабильности. При нейросетевом моделировании был сохранен нелинейный характер порождения ряда из значений обменного курса, а также была отмечена асимметрия реакции курса рубля на различные по знаку шоки цен нефти. Отбор гиперпараметров, применение бутстрапа и использование ансамблей нейронных сетей обеспечили более стабильные оценки и доверительные интервалы для эластичности курса рубля по ценам на нефть. Таким образом, сочетание указанных методов позволяет получить содержательные экономические выводы на основе обученной нейронной сети, избегая проблемы неинтерпретируемости весов нейросетевой модели.

**Ключевые слова:** нейронные сети, ансамблевые методы, бутстрап, многослойный перцептрон, рекуррентная нейронная сеть, обменный курс, цены на нефть

**Для цитирования:** Полбин А. В., Кропочева М. А. Моделирование зависимости обменного курса рубля от цен на нефть с использованием нейронных сетей // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 4. С. 127–142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-127-142

# Modeling the relationship between the Russian ruble exchange rate and oil prices using artificial neural networks

A. Polbin<sup>1,2</sup>, M. Kropocheva<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Gaidar Institute for Economic Policy, Moscow, Russia

\* [kropocheva-ma@ranepa.ru](mailto:kropocheva-ma@ranepa.ru)

**Abstract.** The article examines the dependence between the Russian ruble exchange rate and oil prices with the use of neural network modeling. The relevance of the study can be confirmed by the interest of the monetary authorities in modeling the dynamics of the exchange rate for developing monetary policy measures. The research objective of the article is the estimation of the relationship between the Russian ruble exchange rate and oil prices using multilayer perceptron and recurrent neural network models. Moreover, the influence of additional factors, including foreign exchange interventions and geopolitical risks, is estimated. The results show that neural networks provide sufficient accuracy in estimation of the target variable. Furthermore, during the periods with foreign exchange interventions and high geopolitical instability there was confirmed a decoupling of the examined variables. The modeled time series preserve non-linear nature of exchange rate data generating process, as well as the asymmetry in the reaction of the ruble exchange rate to oil price shocks. The hyperparameters selection, use of bootstrap and ensembles of neural networks provide more robust estimates and confidence intervals for the oil price elasticity of the ruble exchange rate. Therefore, the combination of the aforementioned methods makes it possible to draw meaningful economic conclusions based on the trained neural networks, avoiding the problem of neural network weights non-interpretability.

**Keywords:** neural networks, ensemble methods, bootstrap, multilayer perceptron, recurrent neural network, exchange rate, oil prices

**For citation:** Polbin A., Kropocheva M. Modeling the relationship between the Russian ruble exchange rate and oil prices using artificial neural networks. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.4, pp.127-142 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-4-127-142

## Введение

В условиях сильной зависимости экономики России от экспорта нефти влияние цен на нефть на экономический рост и макроэкономические показатели России, в частности на валютный курс, проявляется достаточно значимо. С учетом того, что колебания обменного курса отражаются на конкурентоспособности национальных товаров, доходности национальных активов относительно иностранных, на инфляционных процессах, можно говорить о востребованности инструмента моделирования обменного

курса при разработке проекта федерального бюджета, при планировании внешнеторговой политики и принятии решений в области денежно-кредитной политики.

В последние годы при моделировании макроэкономических показателей специалисты все чаще обращаются к искусственным нейронным сетям (ИНС): несмотря на то, что обоснование результатов, полученных с использованием нейронных сетей, может быть проблематичным, предикативные возможности этого инструмента достаточно высоки и, как показывают исследования [5, 7, 14], сравнимы

по точности с прогнозами традиционных эконометрических подходов. Поскольку в макроэкономическом анализе преобладают методы регрессионного анализа, определение оптимальной спецификации эконометрической модели бывает затруднительно по причине часто нелинейной взаимосвязи между зависимыми и независимыми переменными. ИНС обходят эту проблему, что подтверждает перспективность их использования для прогноза макроэкономических показателей, в частности для моделирования обменного курса рубля.

Несмотря на ряд преимуществ нейронных сетей, при нейросетевом моделировании сохраняется проблема обоснования результатов, связанная с многочисленностью и неинтерпретимостью весов обученной нейронной сети. Следовательно, затруднительны выводы о влиянии отдельных предикторов на целевую переменную (по крайней мере, если опираться не на оцененную функцию в целом, а на отдельные веса). Кроме того, результаты обучения ИНС чувствительны к выбору гиперпараметров и архитектуре сети, а сами модели неидентифицируемы [18]. Указанные особенности вызывают затруднения при получении устойчивых оценок исследуемых параметров.

Для решения проблемы интерпретации и статистического обоснования результатов, полученных при нейросетевом моделировании, в данной работе предлагается подход с использованием бустрапа и ансамблей нейронных сетей. Представленный метод расширяет возможности применения нейронных сетей в экономическом анализе, позволяя не только моделировать целевую переменную в виде обменного курса рубля, но и проверять гипотезы о влиянии дополнительных переменных на связь между обменным курсом рубля и ценами на нефть.

### Используемые модели нейронных сетей

В данной работе рассматриваются две классические архитектуры ИНС: много-

слойный перцептрон и рекуррентная нейронная сеть.

Пусть матрица  $Y$  размерности  $(n \times T)$  представляет собой  $n$  целевых переменных, наблюдаемых в  $t = 1 \dots T$  моментов времени. Аналогично, матрица  $X$  размерности  $(m \times T)$  является набором из  $m$  объясняющих переменных, наблюдаемых в  $t = 1 \dots T$  моментов времени. Тогда смоделированные значения целевых переменных, получаемые с помощью полносвязного многослойного перцептрона с одним скрытым слоем, можно задать следующим математическим выражением [13]:

$$o_{h,t} = \Phi \left( \beta_{h,0} + \sum_{i=1}^q \beta_{h,i} \times \Psi \left( \gamma_{i,0} + \sum_{j=1}^m \gamma_{i,j} x_{j,t} \right) \right), \quad (1)$$

где  $x_{j,t}$  – элемент матрицы  $X$  (наблюдение  $j$ -го регрессора в момент времени  $t$ );

$q$  – число нейронов в скрытом слое;

$\gamma_{i,j}$  – вес  $j$ -го регрессора в функции активации  $i$ -го нейрона скрытого слоя;

$\gamma_{i,0}$  – смещение (bias)  $i$ -го нейрона скрытого слоя;

$\Psi$  – нелинейная функция активации нейронов скрытого слоя;

$\beta_{h,i}$  – вес  $i$ -го нейрона в функции активации выходного слоя для  $h$ -й целевой переменной ( $h = 1 \dots n$ );

$\beta_{h,0}$  – смещение в функции активации выходного слоя для  $h$ -й целевой переменной;

$\Phi$  – функция активации выходного слоя;

$o_{h,t}$  – смоделированное значение  $h$ -й целевой переменной в момент времени  $t$ .

В отличие от многослойного перцептрона, в рекуррентных ИНС входной слой содержит не только объясняющие переменные, но и прошлые значения выходного или скрытого слоя. Такой подход позволяет учитывать динамику целевой переменной, поэтому в эмпирических работах к рекуррент-

ным нейронным сетям нередко обращаются при моделировании временных рядов.

В данной работе используется рекуррентная ИНС с откликом от скрытого слоя. Формально такую модель можно представить следующим образом [13]:

$$\begin{aligned} o_{h,t} &= F\left(\beta_{h,0} + \sum_{j=1}^q \beta_{h,j} \alpha_{t,j}\right), \\ \alpha_{t,j} &= G\left(\gamma_{j,0} + x'_t \gamma_j + \alpha'_{t-1} \delta_j\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F$  – функция активации выходного слоя;

$G$  – нелинейная функция активации нейронов скрытого слоя;

$\alpha_{t-1} = (\alpha_{t-1,1}, \dots, \alpha_{t-1,q})'$  – вектор прошлых значений нейронов скрытого слоя;

$\delta_j$  – вектор весов, с которыми прошлые значения нейронов скрытого слоя будут учтены при текущем вычислении функции активации.

Нейронные сети являются универсальными аппроксиматорами: при достаточно большом числе нейронов скрытого слоя ИНС может с приемлемой точностью аппроксимировать значительный класс функций [10]. Таким образом, при использовании нейронных сетей в экономических задачах нет необходимости заранее задавать вид функциональной зависимости между исследуемыми переменными. Следовательно, не возникает проблема неправильной спецификации модели. Как упоминалось ранее, нейронные сети являются классом нелинейных моделей. Для экономических исследований это означает, что использование ИНС при изучении зависимости между рядом переменных позволяет оценить более сложные, нелинейные взаимосвязи, которые могут быть упущены линейными эконометрическими моделями [13]. Поскольку процесс, порождающий ряд из значений обменного курса, может содержать нелинейные зависимости [15], указанные преимущества позволяют считать нейронные сети привлекательным инструментом для моделирования обменного курса.

### Ансамблевый метод получения робастных оценок посредством нейронных сетей

Как упоминалось ранее, при получении оценок интересующих параметров невозможно опираться на веса нейросетевой модели ввиду невозможности их интерпретации. Кроме того, на основе обученной нейронной сети затруднительно получить стабильные оценки интересующих параметров даже при высокой точности моделирования целевой переменной.

Перечисленные сложности связаны с рядом недостатков, характерных для нейросетевых моделей. Во-первых, результаты обучения ИНС очень чувствительны к выбору гиперпараметров и архитектуре сети [18]. Эта чувствительность отражает проблему балансировки ошибок аппроксимации и оценивания. Сложная модель, как правило, имеет большие ошибки оценки и меньшие ошибки аппроксимации; для простой модели ситуация обратная. Когда высоки либо ошибки аппроксимации, либо ошибки оценки, то общая эффективность ИНС, представленная ошибкой обобщения, низка. Выбор гиперпараметров позволяет контролировать сложность модели ИНС. Для выбора из большого количества гиперпараметров обычно используются случайный поиск и поиск по сетке. Также контролировать ошибку обобщения нейронной сети можно, используя ансамбли моделей. Было доказано, что ошибка обобщения ансамблевой модели всегда меньше, чем средняя ошибка отдельных моделей [12].

Во-вторых, модели ИНС неидентифицируемы, поскольку при высокой размерности входных данных минимизируемая функция эмпирического риска (ERM) не является выпуклой [18]. Учитывая невыпуклость ERM, обучение ИНС очень чувствительно к инициализации. При различных инициализациях начальных весов обучение модели ИНС может заканчиваться в различных локальных минимумах или седловых точках. Проблема неиден-

тификации модели означает, что даже на фиксированной выборке каждое обучение ИНС с неизменными параметрами может привести к сильно различающимся моделям. Важно отметить, что такие ИНС могут иметь очень схожие характеристики прогнозирования (например, близкие ошибки прогноза по тестовой выборке), что создает трудности при выборе окончательной модели для интерпретации.

В-третьих, возникновение взрывных градиентов может ухудшить экономическую обоснованность функции, получаемой с помощью ИНС. При взрывных градиентах возможны ситуации, когда незначительное изменение входных данных существенно влияет на выходной результат – модель не робастная. Увеличение размера выборки и использование ансамблей моделей позволяет повысить робастность нейронной сети [18]. Другие исследования предлагают устранять проблему взрывного градиента с помощью выбора более устойчивых архитектур нейронных сетей, таких как LSTM [9].

С учетом описанных проблем в данной работе используется ансамблевый подход к получению экономической информации на основе нейронных сетей. При этом интерпретация результатов ИНС основывается на всей функции, полученной после обучения нейронной сети, а не на отдельных параметрах (весах ИНС). Для начала задается пространство гиперпараметров (в качестве гиперпараметров рассматриваются число нейронов в скрытом слое, функция активации и алгоритм обучения). Далее с помощью случайного поиска отбирается модель с набором гиперпараметров, дающим наименьшую прогнозную ошибку на тестовой выборке. После выявления оптимальных гиперпараметров на основе тренировочной выборки с помощью бутстрапа создается 500 дополнительных реализаций. На каждой сгенерированной выборке до получения низкой ошибки прогноза по неизменной тестовой выборке обучаются 500 одинаковых моделей с отобраным набором гиперпараметров. Вследствие различий в тренировочных выборках, а также неидентифицируемости

нейронных сетей веса полученных моделей будут различаться в зависимости от инициации начальных весов; при этом прогнозная точность всех моделей будет сопоставима. Для получения итоговых результатов обученные нейронные сети объединяются в простейший ансамбль – индивидуальные результаты всех моделей усредняются. Описанный алгоритм близок к методу из работы [18], за исключением того, что тестовая выборка не является фиксированной. Бутстрап-преобразование позволяет внести неопределенность в данные, что делает дальнейшее применение статистических тестов более обоснованным.

Таким образом достигается достаточно высокая интерпретируемость результатов, полученных с помощью нейронных сетей. Без качественного отбора гиперпараметров возможно неадекватное описание зависимости между данными (недостаточная точность прогнозирования или близкие к нулю градиенты, не дающие представления, например, об истинных эластичностях). В то же время единичная нейронная сеть с подобранными гиперпараметрами и низкой ошибкой прогноза может при каждом новом обучении приходиться в различный локальный минимум. Из-за этого невозможна воспроизводимость результатов, ведь сильные колебания весов существенно влияют на то, как изменение одного регрессора при фиксации остальных будет изменять целевую переменную. Отбор гиперпараметров и применение ансамбля ИНС позволяет добиться большей стабильности и привести получаемые оценки экономических показателей к теоретически обоснованным значениям, сопоставимым с результатами эталонных эконометрических моделей.

### **Результаты моделирования зависимости обменного курса рубля от цен на нефть**

В настоящей работе используются данные по обменному курсу рубля к доллару и цене

на нефть марки Brent за период с 1 января 2009 г. по 22 февраля 2022 г. Данные за более поздние периоды не рассматриваются в связи с существенной геополитической нестабильностью, затрудняющей экономическое моделирование. Выбор нижней границы обусловлен тем, что с 2004 по 2008 г. валютный курс колебался незначительно [2]. Обменный курс рубля определяется как цена закрытия торгов долларом США за российские рубли с расчетами «завтра» на Московской бирже, измеренная в рублях за доллар. В качестве переменной цены нефти берется расчетная цена фьючерса на нефть марки Brent (в долларах США за баррель нефти) на Межконтинентальной бирже. В полученную выборку из 3301 наблюдения не входят выходные и праздничные дни, в которые торги хотя бы на одном из рынков не проводились. Для оценки моделей и прогнозирования использовались приросты логарифмов значений обменного курса и цен на нефть.

На преобразованных данных оценивались шесть моделей: два многослойных перцептрона с одним и двумя входными нейронами соответственно, две рекуррентные нейронные сети с аналогичными входами, а также две линейные модели, рассматриваемые в качестве эталонных. В многослойном перцептроне и рекуррентной нейронной сети с одним входным нейроном (модели  $MLP_{Brent}$  и  $RNN_{Brent}$ ) на вход подается прирост в логарифмах цены на нефть за период  $t$ , на выходе ожидается значение прироста в логарифмах валютного курса за период  $t$ . В моделях с двумя входными нейронами (модели  $MLP_{Brent,Er}$  и  $RNN_{Brent,Er}$ ) на вход подается прирост в логарифмах цены на нефть за период  $t$ , а также лаговое значение прироста валютного курса за период  $t-1$ . Ожидаемое на выходе значение – прирост в логарифмах валютного курса за период  $t$ . Таким образом, по аналогии с работой [3] рассматривается задача моделирования нелинейной взаимосвязи текущих значений обменного курса и текущих цен на нефть. В обоих перцептронах в качестве

алгоритма обучения применяется алгоритм Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно с использованием ограниченного объема компьютерной памяти (LBFGS), а в качестве функции активации взят гиперболический тангенс. Модель  $MLP_{Brent}$  содержит 11 нейронов скрытого слоя; в модели  $MLP_{Brent,Er}$  13 нейронов скрытого слоя. Оптимальные количества нейронов скрытого слоя были получены с использованием поиска по сетке, в ходе которого сравнивались модели с различными функциями активации, алгоритмами обучения и числом нейронов скрытого слоя от 7 до 15. Для рекуррентной нейронной сети с одним входным нейроном использовались 5 нейронов скрытого слоя и функция активации  $\tanh$ , во второй рекуррентной нейронной сети – 9 нейронов скрытого слоя и аналогичная функция активации. Обе рекуррентные сети обучались с использованием стохастического градиентного спуска.

Архитектуры с одним скрытым слоем и числом нейронов от 5 до 20 являются довольно распространенными в существующей литературе по моделированию финансовых временных рядов, в том числе обменных курсов [5, 14]. Несмотря на наличие архитектур с десятками тысяч параметров, подобные нейронные сети чаще встречаются в задачах с большим объемом информации, например в распознавании образов, обработке аудиосигналов или для моделирования достаточно длинных временных рядов на основе большого количества предикторов. В данной статье ставится задача моделирования одного временного ряда на основе одного или двух предикторов, что делает проблематичным получение большого числа обучаемых параметров. Использование архитектур со значительным числом связей между нейронами (например, LSTM) позволило бы увеличить число обучаемых параметров. Однако, как показывает работа [7], использование более сложных архитектур не всегда позволяет добиться более высокой точности моделирования. Кроме того, выбор архитектуры с одним

скрытым слоем и малым числом нейронов обусловлен стремлением сохранить высокую обобщающую способность нейронной сети. При отборе моделей увеличение числа нейронов скрытого слоя, а также добавление второго скрытого слоя не позволили значительно уменьшить ошибку прогноза, поэтому расширение модели могло привести к избыточности.

Аналогично модели с одним предиктором, линейная регрессия с одним регрессором ( $LinReg_{Brent}$ ) определяют логарифмический прирост обменного курса за период  $t$ , используя прирост в логарифмах цены на нефть за период  $t$ :

$$\Delta \ln(Er_t) = \beta_0 + \beta_1 \Delta \ln(Brent_t) + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где  $Er_t$  – обменный курс рубля к доллару США в момент времени  $t$ ;

$Brent_t$  – цена нефти в момент времени  $t$ ;

$\varepsilon_t$  – случайная ошибка.

Наконец, в линейной модели с двумя регрессорами ( $ADL_{Brent,Er}$ ) логарифмический прирост обменного курса за период  $t$  определяется через прирост в логарифмах цены на нефть за период  $t$  и лаговое значение прироста валютного курса за период  $t-1$ :

$$\Delta \ln(Er_t) = \beta_0 + \beta_1 \Delta \ln(Brent_t) + \beta_2 \Delta \ln(Er_{t-1}) + \varepsilon_t. \quad (4)$$

Для обучения и оценивания моделей исходная выборка была разделена на тренировочную и тестовую части в отношении 2:1. На рисунке 1 представлен график значений целевой переменной. Трём наиболее выделяющимся пикам соответствуют реакции на усиление санкций в апреле и августе 2018 г. и обвал цен на нефть в сочетании с общим экономическим спадом в период пандемии (весна 2020 г.).

После обучения на выборке из данных до 2018 года были получены прогнозы для четырех нейронных сетей и двух линейных моделей. Для каждой тройки моделей можно отметить, что прогнозы линейных моделей характеризуются большей волатильностью, чем прогнозы нейронных сетей. Однако в модели с двумя предикторами прогнозы многослойного перцептрона обладают большей волатильностью в сравнении с прогнозами аналогичной сети без дополнительного предиктора. Для рекуррентных нейронных сетей ситуация обратная. В качестве метрик для сравнения моделей были выбраны средняя абсолютная ошибка (MAE) и средняя квадратичная ошибка (RMSE), значения которых приведены в таблице 1.

Как показывают статистики качества прогнозов, в обеих группах моделей (с одним и с двумя предикторами) нейросе-

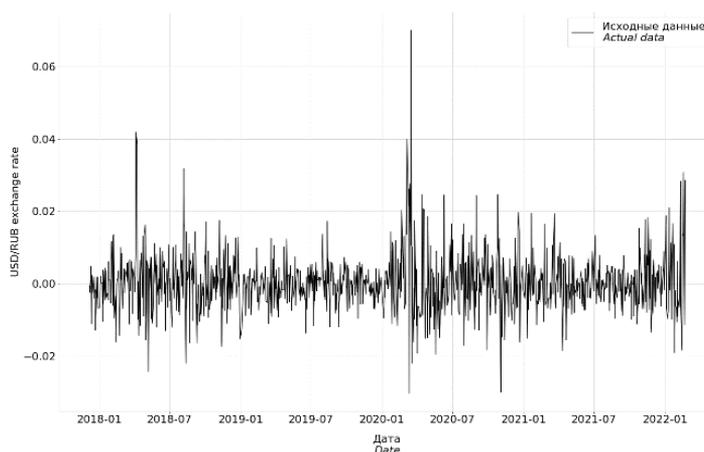


Рис. 1. Целевая переменная (прирост обменного курса в логарифмах)

Fig. 1. Target variable (logarithmic first differences of exchange rate)

тевые модели имеют несколько меньшие ошибки прогноза. Наименьшая средняя абсолютная ошибка оказалась у рекуррентной нейронной сети с двумя предикторами (0,00528), при этом ее среднеквадратичная ошибка, составившая 0,00747, является второй по величине. У многослойного перцептрона с одним предиктором, напротив, наименьшая среднеквадратичная ошибка (0,00742) и вторая по величине средняя абсолютная ошибка (0,00529). Для линейных моделей можно отметить, что включение дополнительного регрессора позволило незначительно уменьшить среднюю абсолютную и среднеквадратичную ошибки прогноза.

Поскольку статистики качества прогнозов у модели  $MLP_{Brent}$  и сопоставляемых моделей отличаются на малые величины, желательно проверить гипотезу о статистической значимости различий в прогнозах моделей. Для проверки гипотезы был использован тест Диболда – Мариано [8] с квадратичной функцией ошибок. Его результаты приведены в таблице 2.

Учитывая нормальное распределение статистики теста Диболда – Мариано, на уровне значимости 5% отвергается гипотеза о незначимости различий в прогнозах всех ней-

ронных сетей в сравнении с  $MLP_{Brent}$ , кроме рекуррентной нейронной сети с двумя предикторами. Гипотеза о незначимости различий прогнозов  $MLP_{Brent}$  и двух линейных моделей также отвергается на уровне значимости 5%. Дополнительные тестирования для остальных нейронных сетей показали, что обе рекуррентные нейронные сети незначимо отличаются между собой на 10%-ном уровне значимости, но значимо отличаются от линейных моделей.  $MLP_{Brent,Er}$  незначимо отличается от обеих рекуррентных нейронных сетей на 10%-ном уровне значимости, при этом различия с линейными моделями значимы на уровне значимости 5%.

Таким образом, все четыре рассматриваемые нейронные сети статистически значимо превосходят по качеству эталонные модели при моделировании прироста в логарифмах значений обменного курса.

### Асимметрия реакции курса рубля на шоки цен нефти

Для проверки асимметричности реакции курса рубля в ответ на различные по знаку шоки цен нефти необходимо определить, каким образом изменение цен нефти будет отражено в модели. Учитывая, что в качестве

**Таблица 1.** Статистики качества прогнозов моделей

**Table 1.** Model performance metrics

Модель <i>Model</i>	$MLP_{Brent}$	$RNN_{Brent}$	$LinReg_{Brent}$	$MLP_{Brent,Er}$	$RNN_{Brent,Er}$	$ADL_{Brent,Er}$
MAE	0,00529	0,00538	0,00575	0,00556	0,00528	0,00574
RMSE	0,00742	0,00754	0,00802	0,00759	0,00747	0,00801

**Таблица 2.** Результаты теста Диболда – Мариано на значимость различий в прогнозах моделей (сравнение с  $MLP_{Brent}$ )

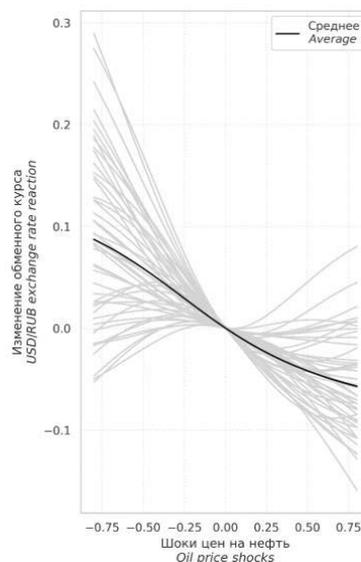
**Table 2.** Results of Diebold – Mariano test for predictive accuracy (compared to  $MLP_{Brent}$ )

Модель <i>Model</i>	$RNN_{Brent}$	$LinReg_{Brent}$	$MLP_{Brent,Er}$	$RNN_{Brent,Er}$	$ADL_{Brent,Er}$
Тестовая статистика <i>Test statistic</i>	-2,5867	-3,2680	-2,0697	-1,5098	-3,1934
р-значение <i>p-value</i>	0,0098	0,0011	0,0387	0,1314	0,0014

данных используются первые разности логарифмов курса рубля и цен на нефть, а разность натуральных логарифмов двух значений примерно равна различию указанных величин в процентах, то изменение цены на нефть в реальном выражении, например на 10%, будет соответствовать примерно 0,1 в разностях логарифмов. Если на вход нейронной сети подать изменения в долях цены нефти при нулевом изменении регрессора лага курса, то на выходе будет получено соответствующее изменение в долях обменного курса за тот же период. Таким образом была получена кривая реакции курса рубля на шоки цен нефти.

Учитывая проблему неидентифицируемости нейронной сети, а также сильную зависимость результатов моделирования от выбора гиперпараметров, получение функции реакции обменного курса на шоки цен на нефть с использованием одной обученной модели представляется затруднительным. В зависимости от инициации весов при каждом повторном обучении модели функции реакции могут значительно различаться даже при сходных метриках качества прогнозов моделей. Для решения описанной проблемы применяется двухшаговая процедура получения стабильных оценок на основе ансамбля нейронных сетей. Сперва определяется пространство гиперпараметров (в данном случае к гиперпараметрам относятся функция активации, число нейронов скрытого слоя и алгоритм обучения). Далее случайным поиском отбирается набор гиперпараметров, при котором модель характеризуется наименьшей средней абсолютной ошибкой прогноза. На втором шаге последовательно обучаются 50 одинаковых моделей с отобранными параметрами. Для обучения каждой модели на основе исходной тренировочной выборки бутстрапом генерируются 50 выборок. После обучения на вход каждой модели подается ряд изменений в долях цен на нефть. Полученные на основе указанных входных данных значения обра-

зуют кривую реакции курса рубля на шоки нефтяных цен. На рисунке 2 представлена кривая реакции для рекуррентной нейронной сети с одним предиктором.



**Рис. 2.** Кривая реакции обменного курса рубля на шоки цен нефти для рекуррентной нейронной сети с одним предиктором

**Fig. 2.** Reaction curve of Russian ruble exchange rate in response to oil price shocks based on recurrent neural network with one input neuron

Можно отметить, что реакция обменного курса на изменение цены нефти нелинейна. Кроме того, отрицательным шокам цен на нефть соответствует более сильное изменение курса рубля – реакция асимметрична для положительных и отрицательных шоков цен на нефть, что согласуется с существующими исследованиями [4]. Одно из возможных объяснений связано с предпочтениями инвесторов в периоды неопределенности на финансовых рынках. При высокой волатильности цен на нефть отечественные инвесторы склонны увеличивать сбережения в зарубежных финансовых активах из-за мотива предосторожности, что стимулирует отток капитала. При этом увеличение оттока капитала из-за мотива предосторожности происходит как при удорожании, так и при удешевлении нефти.

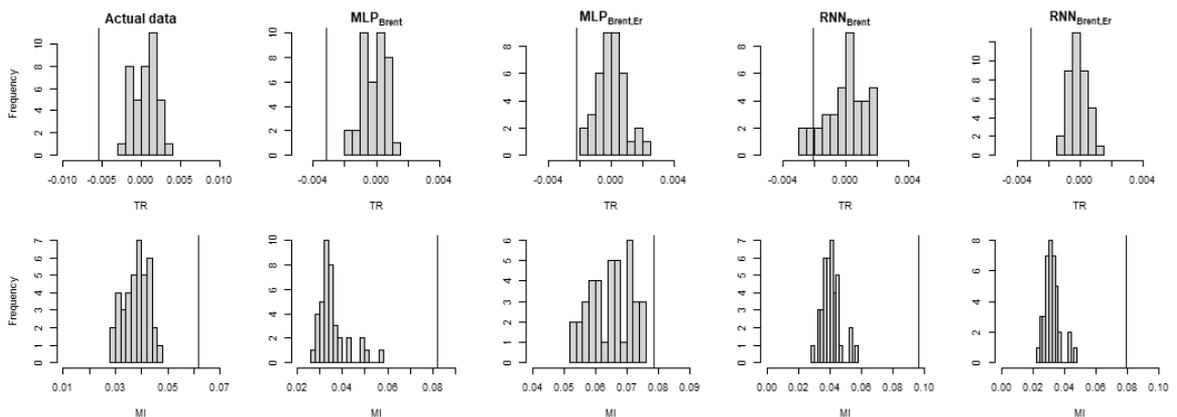
Таким образом, при резком возрастании цен на нефть фактором укрепления обменного курса рубля будет приток валюты из-за дополнительной прибыли нефтегазовых компаний в долларах, а фактором ослабления будет отток капитала из-за мотива предосторожности. При отрицательном же шоке цен на нефть два эффекта действуют сопоставленно.

### Тестирование нелинейности ряда смоделированных значений

При моделировании логарифмических приростов обменного курса желательно убедиться, что моделью сохранены характеристики исходного ряда, в частности его нелинейный характер. При тестировании нелинейности был применен описанный в работе [17] подход с использованием суррогатных реализаций временного ряда. За исходное предположение принималась гипотеза о том, что исходные данные порождаются монотонным непрерывным преобразованием Гауссова процесса. В качестве тестовых статистик использовались асимметрия при обращении времени (TR) и взаимная информация (MI). На рисунке 3 в первом столбце представлены результаты тестирования нелинейности исходного ряда, в столбцах со второго по пятый – результаты

тестирования нелинейности рядов из значений, смоделированных четырьмя моделями – рекуррентными нейронными сетями и многослойными перцептронами с одним и двумя предикторами. Вертикальной линией отмечено значение тестовой статистики для оригинального ряда, гистограммы представляют собой эмпирическое распределение тестовых статистик для суррогатных рядов. В верхнем ряду указаны результаты для статистики, учитывающей асимметрию при обращении времени, в нижнем ряду – результаты для взаимной информации.

По результатам тестирования обоими статистиками на 5%-ном уровне значимости отвергается гипотеза о порождении исходного ряда монотонным непрерывным преобразованием Гауссова процесса – предполагается нелинейность исходных данных. Такой же вывод был получен для обоих многослойных перцептронов и рекуррентной нейронной сети с двумя предикторами. Для рекуррентной сети с одним предиктором результат неоднозначен: статистика TR оказалась третьей, а не первой по величине в сравнении со статистиками для суррогатных рядов. Однако статистика MI позволяет отвергнуть нулевую гипотезу и засвидетельствовать нелинейность смоделированного ряда.



**Рис. 3.** Результаты тестов на нелинейность исходного ряда и рядов из смоделированных значений логарифмических приростов обменного курса

**Fig. 3.** Nonlinearity tests results for actual and modeled logarithmic first differences of exchange rate

## Влияние валютных интервенций на курс рубля

Для оценки влияния валютных интервенций на курс рубля к описанным переменным были добавлены следующие данные по валютным интервенциям: объем долларов, распределенных на аукционах РЕПО [16], а также покупка и продажа долларов Центральным Банком. Под положительными валютными интервенциями далее подразумевается продажа иностранной валюты, а под отрицательными валютными интервенциями – покупка иностранной валюты Банком России.

В качестве модели для оценки влияния валютных интервенций использовался многослойный перцептрон. Выбор модели обусловлен более высокой скоростью обучения модели без рекуррентной составляющей; кроме того, по результатам теста Диболда – Мариано, качества прогнозов многослойного перцептрона с двумя предикторами и соответствующей рекуррентной нейронной сети отличались незначительно. Было выделено два периода: первый – с октября 2013 г. по середину апреля 2017 г., когда Банк России вмешивался в ход торгов на Московской бирже и проводил стерилизованные интервенции в виде аукциона РЕПО; второй период – с конца апреля 2017 г. по февраль 2022 г., когда интервенции не проводились.

На данных по каждому из периодов проводилась оценка эластичности обменного курса по ценам на нефть при различном объеме инвестиций. Для этого исходные данные за рассматриваемый период разделялись на тренировочную и тестовую выборки, после чего на основе тренировочной выборки с помощью бутстрапа создавалось 500 дополнительных реализаций. На исходной тестовой выборке с помощью случайного поиска проводился отбор гиперпараметров (числа нейронов в скрытом слое, функции активации и алгоритма обучения). В результате отбирался набор параметров, дающий наименьшую ошибку прогноза на тестовой выборке.

Далее на каждой из сгенерированных бутстрапом тренировочных выборок нейронная сеть с отобранными гиперпараметрами обучалась до получения низкой ошибки прогноза по неизменной тестовой выборке (средняя абсолютная ошибка прогноза ниже, чем полученные с использованием линейной регрессионной модели соответствующие показатели: 0,0058 для периода проведения интервенций и 0,0055 для периода без вмешательства Центрального Банка, либо она превосходит ошибку эталонной модели не более чем на 5%). Поскольку данные по обменному курсу и по ценам на нефть взяты в логарифмических разностях, то возможно рассматривать используемые значения как процентные изменения каждой переменной. Соответственно, при отправлении на вход обученной модели значения 0,01 для цен на нефть и некоторого объема валютных интервенций полученное на выходе значение будет процентным изменением обменного курса в ответ на однопроцентный рост цены нефти при данном объеме валютных интервенций. Таким образом, по каждой из 500 обученных моделей были получены эластичности курса рубля по нефтяным ценам при 10, 50 и 90-х перцентилях положительных и отрицательных валютных интервенций; результаты приведены в таблице 3. В качестве итоговой эластичности были взяты средние значения рассчитанных показателей.

Согласно модели для периода проведения интервенций, при возрастании цены нефти на 1% в этот период курс рубля укреплялся в среднем на 0,26%. Стоит отметить, что при достаточно большом объеме интервенций зависимость между курсом рубля и нефтяными ценами значительно ослабевает: коэффициент эластичности для 90-го перцентиля положительных интервенций незначительно отличается от нуля по результатам *t*-теста Стьюдента (*p*-значение составило 0,14 при нулевой гипотезе о равенстве нулю средней эластичности). Учитывая, что 90-й перцентиль положительных интервенций соответ-

**Таблица 3.** Значения эластичности курса рубля по ценам нефти при низком, среднем и высоком объеме положительных и отрицательных валютных интервенций (в скобках указаны стандартные отклонения средних)

**Table 3.** Oil price elasticity of exchange rate at low, medium and high volume of positive and negative foreign exchange interventions (standard deviations of mean are given in parenthesis)

Перцентиль объема валютных интервенций <i>Percentile of foreign exchange (FX) intervention volumes</i>	Эластичность при положительных валютных интервенциях <i>Elasticity for positive FX interventions</i>	Эластичность при отрицательных валютных интервенциях <i>Elasticity for negative FX interventions</i>
10	-0,276 (0,086)	-0,280 (0,085)
50	-0,264 (0,089)	-0,294 (0,085)
90	-0,026 (0,416)	-0,416 (0,211)

ствуует 3,7 млрд долл., то при прочих равных такой объем продажи иностранной валюты Центральным Банком в 2013-2017 гг. позволял отвязать курс от изменения нефтяных цен. В период, когда интервенции не проводились (май 2017 г. – февраль 2022 г.), эластичность курса рубля по ценам на нефть составила  $-0,089$  – значительно меньше, чем эластичности в период проведения интервенций. Возможно, снижение зависимости курса рубля от цен нефти связано с введением бюджетного правила в 2017 г. В работе [1] отмечалось, что в период с января 2013 г. по декабрь 2016 г. по расчетам на ежемесячных данных коэффициент парной корреляции между обменным курсом рубля и ценами на нефть составлял  $0,99$ , а с февраля 2017 г. по март 2020 г. –  $0,49$  (оба коэффициента значимы на уровне значимости 1%). В этой же работе авторы получили значения эластичности курса рубля по ценам нефти, равные  $0,318$  в период 2015–2017 гг., и  $0,038$  в период 2017–2019 гг., что согласуется со значимым уменьшением эластичности, полученным в данной работе. Другой возможной причиной сниженной зависимости может являться рост волатильности обменного курса из-за введения санкций.

### Влияние геополитических рисков на зависимость курса рубля от цен на нефть

Результаты предыдущих исследований [11] свидетельствуют, что неопределенность на финансовых рынках оказывает значимое влияние на обменный курс. В связи с этим желательно проверить, изменяется ли зависимость между обменным курсом рубля и ценами нефти при разной степени геополитических рисков. В качестве низкого, среднего и высокого значения геополитической неопределенности были выбраны соответственно 10, 50, 90-е перцентили ежемесячного индекса геополитических рисков для России (GPR) [6].

Аналогично предыдущим пунктам для проверки значимости различий между эластичностями исходные ряды значений обменного курса рубля, цен на нефть и индекса GPR, охватывающие период с 2009 по 2022 г., разделялись на тренировочную и тестовую выборки. Данные предварительно стандартизировались для получения более стабильных весов при обучении нейронной сети. На исходных тренировочной и тестовой выборках определялись оптимальные гиперпараметры, а на 500 сгенерированных бутстрапом ре-

ализациях тренировочной выборки обучались нейросетевые модели с выбранными параметрами. Обучение проводилось до получения низкой ошибки прогноза по неизменной тестовой выборке (средняя абсолютная ошибка прогноза ниже соответствующего показателя 0,0057, полученного с использованием линейной регрессионной модели, либо превосходит ошибку эталонной модели не более чем на 5%). Для расчета эластичности курса рубля по ценам нефти на вход обученных нейронных сетей подавалось преобразованное после стандартизации значение 0,01 для логарифмической разности цен нефти и 10, 50 или 90-й перцентиль значений индекса GPR. Полученные значения эластичностей представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Значения эластичности курса рубля по ценам на нефть при низком, среднем и высоком уровне геополитических рисков (в скобках указаны стандартные отклонения средних)

**Table 4.** Oil price elasticity of exchange rate at low, medium and high level of geopolitical risks (standard deviations of mean are given in parenthesis)

Перцентиль индекса GPR <i>Percentile of GPR Index</i>	Эластичность <i>Elasticity</i>
10	-0,183 (0,103)
50	-0,174 (0,067)
90	-0,153 (0,127)

После получения ряда из эластичностей тестировалась гипотеза о равенстве средних в распределениях эластичностей при низком, среднем и высоком значении индекса геополитических рисков. Для тестирования гипотезы использовался *t*-тест Стьюдента. Результаты тестирования показывают, что эластичности курса рубля по ценам на нефть при низких и средних значениях индекса GPR незначимо различаются между собой, тогда как эластичность при высоких значениях индекса значимо отличается от двух упомянутых показателей. Если цены на нефть растут

на 1%, то значение курса снижается на 0,15% при высоких значениях индекса геополитических рисков и примерно на 0,18% при низких и средних значениях индекса. Следовательно, при высоких геополитических рисках обменный курс рубля слабее зависит от роста цен на нефть, что может быть связано с усиливающейся волатильностью обменного курса в период геополитической неопределенности [3].

## Заключение

Данная работа подтверждает, что нейронные сети как нелинейные модели и универсальные аппроксиматоры являются приемлемым инструментом моделирования обменного курса рубля по ценам на нефть. С помощью теста Диболда – Мариано было показано, что все рассматриваемые ИНС статистически значимо превосходят по результатам моделирования линейные модели. Было также подтверждено наличие асимметрии в реакции обменного курса на различные по знаку шоки цен на нефть. Как показало тестирование на нелинейность, рассматриваемый временной ряд из значений обменного курса порождается нелинейным процессом, и указанная особенность сохраняется в смоделированных нейронными сетями значениях. Включение в модель дополнительной объясняющей переменной в виде валютных интервенций позволило подтвердить эффективность вмешательства Центрального Банка для снижения влияния шоков цен нефти на обменный курс. При этом для получения стабильных оценок эластичностей с помощью нейронных сетей был использован ансамблевый подход с бутстрапированием тренировочной выборки, что является авторским вкладом в русскоязычную исследовательскую литературу по нейросетевому моделированию. В период 2013–2017 гг. эластичность обменного курса отрицательно зависела от объема продажи иностранной валюты, а достаточно высокие объемы продаж (около 3,7 млрд долл.) при прочих равных позволяли сделать незначимым воздействие не-

фтяных цен на курс рубля. Также было показано, что зависимость между обменным курсом и ценами нефти ослабляется при сильной геополитической нестабильности.

Поскольку представленные модели обучались и оценивались на периоде до 22 февраля 2022 г., их практическое применение более обосновано в периоды без сильного санкционного давления, без существенных ограничений на использование золотовалютных резервов в долларах и на рыночные механизмы формирования обменного курса. Тем не менее, учитывая показанную в работе эффективность применения нейронных сетей для моделирования обменного курса, предлагаемые модели могут быть релевантными для периода с усиленными санкциями при условии их повторного обучения на новой выборке. В случае отмены санкций и стабилизации геополитической ситуации возможен возврат к исходным моделям.

Для будущих исследований представляют интерес работы, посвященные применению более сложных архитектур рекуррентных нейронных сетей – LSTM и GRU. Устойчивость этих моделей к проблеме взрывного градиента, а также их способность хорошо улавливать долгосрочные зависимости во временных рядах может быть использована в последующих работах. Кроме того, возможно изучение влияния ряда факторов, не рассматривавшихся в данной статье, на зависимость между обменным курсом и ценами нефти. К числу таких факторов можно отнести число поисковых запросов, связанных с обменным курсом, их позитивную или негативную окрашенность. Возможности нейронных сетей могут также быть применены к задачам оценки рыночных рисков, связанных с волатильностью курса рубля. Указанные предложения дают направления для дальнейшего исследования темы.

### Список литературы

1. *Божечкова А. В., Синельников-Мурылев С. Г., Трунин П. В.* Факторы динамики обменного курса рубля в 2000-е и 2010-е годы // Вопросы экономики. 2020. № 8. С. 5–22. DOI: 10.32609/0042-8736-2020-8-5-22.
2. *Пестова А. А.* Режимы денежно-кредитной политики Банка России: рекомендации для количественных исследований // Вопросы экономики. 2017. № 4. С. 38–60. DOI: 10.32609/0042-8736-2017-4-38-60.
3. *Полбин А. В., Шумилов А. В.* Модель зависимости обменного курса рубля от цен на нефть с марковскими переключениями режимов // Экономика и математические методы. 2020. Т. 56. № 4. С. 88–98. DOI: 10.31857/S042473880012410-0.
4. *Скроботов А. А., Фокин Н. Д.* Тестирование асимметричной сходимости реального обменного курса к равновесному во время режима управляемого курса рубля // Экономическая политика. 2018. Т. 13. № 3. С. 132–147. DOI: 10.18288/1994-5124-2018-3-06.
5. *Adhikari R., Agrawal R. K.* A combination of artificial neural network and random walk models for financial time series forecasting // Neural Computing and Applications. 2014. Vol. 24. No. 6. P. 1441–1449. DOI: 10.1007/s00521-013-1386-y.
6. *Caldara D., Iacoviello M.* Measuring geopolitical risk // International Finance Discussion Paper. 2018. No. 1222. P. 1–66. DOI: 10.17016/IFDP.2018.1222r1.
7. *Dautel A. J., Härdle W. K., Lessmann S., Seow H.-V.* Forex exchange rate forecasting using deep recurrent neural networks // Digital Finance. 2020. Vol. 2. No. 1. P. 69–96. DOI: 10.1007/s42521-020-00019-x.
8. *Diebold F. X., Mariano R. S.* Comparing predictive accuracy // Journal of Business & Economic Statistics. 2002. Vol. 20. No. 1. P. 134–144. DOI: 10.1198/073500102753410444.
9. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long short-term memory // Neural computation. 1997. Vol. 9. No. 8. P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
10. *Hornik K.* Approximation capabilities of multilayer feedforward networks // Neural networks. 1991. Vol. 4. No. 2. P. 251–257. DOI: 10.1016/0893-6080(91)90009-T.
11. *Kisswani K. M., Elian M. I.* Analyzing the (a) symmetric impacts of oil price, economic policy uncertainty, and global geopolitical risk on exchange rate // The Journal of Economic Asymmetries. 2021. Vol. 24. Article e00204. DOI: 10.1016/j.jeca.2021.e00204.

12. Krogh A., Vedelsby J. Neural network ensembles, cross validation, and active learning // Advances in neural information processing systems. 1994. Vol. 7. P. 1–8.
13. Kuan C. M. Artificial neural networks // IEAS Working Paper. 2006. No. 06-A010. P. 1–18.
14. Kuan C. M., Liu T. Forecasting exchange rates using feedforward and recurrent neural networks // Journal of Applied Econometrics. 1995. Vol. 10. No. 4. P. 347–364. DOI: 10.1002/jae.3950100403.
15. Meese R. A., Rose A. K. An empirical assessment of non-linearities in models of exchange rate determination // The Review of Economic Studies. 1991. Vol. 58. No. 3. P. 603–619. DOI: 10.2307/2298014.
16. Shulgin A. Sterilized interventions in the form of foreign currency repos: VECM analysis using Russian data // Russian Journal of Money and Finance. 2018. Vol. 77. No. 2. P. 68–80. DOI: 10.31477/rjmf.201802.68.
17. Theiler J., Prichard D. Constrained-realization Monte-Carlo method for hypothesis testing // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1996. Vol. 94. No. 4. P. 221–235. DOI: 10.1016/0167-2789(96)00050-4.
18. Wang S., Wang Q., Zhao J. Deep neural networks for choice analysis: Extracting complete economic information for interpretation // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2020. Vol. 118. Article 102701. P. 1–39. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102701.

### Сведения об авторах

Полбин Андрей Владимирович, ORCID 0000-0003-4683-8194, канд. экон. наук, заведующий Центром математического моделирования экономических процессов Института прикладных экономических исследований, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ; Институт экономической политики им. Е. Т. Гайдара, Москва, Россия, arolbin@ganepa.ru

Кропочева Маргарита Андреевна, ORCID 0000-0001-5069-7094, младший научный сотрудник Центра математического моделирования экономических процессов Института прикладных экономических исследований, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Москва, Россия, kropocheva-ma@ganepa.ru

Статья поступила 24.06.2022, рассмотрена 15.07.2022, принята 18.08.2022

### Reference

1. Bozhechkova A. V., Sinelnikov-Murylev S. G., Trunin P. V. Factors of the Russian ruble exchange rate dynamics in the 2000s and 2010s. *Voprosy Ekonomiki*, 2020, no.8, pp.5-22 (in Russian). DOI: 10.32609/0042-8736-2020-8-5-22.
2. Pestova A. Monetary policy regimes in Russia: Guidelines for further quantitative studies. *Voprosy Ekonomiki*, 2017, no.4, pp.38-60 (in Russian). DOI: 10.32609/0042-8736-2017-4-38-60.
3. Polbin A., Shumilov A. Modeling the relationship between the Russian ruble exchange rate and oil prices: A Markov regime switching approach. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 2020, vol.56, no.4, pp.88-98 (in Russian). DOI: 10.31857/S042473880012410-0.
4. Skrobotov A., Fokin N. Testing asymmetric convergence of the real exchange rate to equilibrium during ruble exchange rate targeting. *Ekonomicheskaya politika*=Economic Policy, 2018, vol.13, no.3, pp.132-147 (in Russian). DOI: 10.18288/1994-5124-2018-3-06.
5. Adhikari R., Agrawal R. K. A combination of artificial neural network and random walk models for financial time series forecasting. *Neural Computing and Applications*, 2014, vol.24, no.6, pp.1441-1449. DOI: 10.1007/s00521-013-1386-y.
6. Caldara D., Iacoviello M. Measuring geopolitical risk. *International Finance Discussion Paper*. 2018, no.1222, pp.1-66. DOI: 10.17016/IFDP.2018.1222r1.
7. Dautel A. J., Härdle W. K., Lessmann S., Seow H.-V. Forex exchange rate forecasting using deep recurrent neural networks. *Digital Finance*, 2020, vol.2, no.1, pp.69-96. DOI: 10.1007/s42521-020-00019-x.
8. Diebold F. X., Mariano R. S. Comparing predictive accuracy. *Journal of Business & Economic Statistics*, 2002, vol.20, no.1, pp.134-144. DOI: 10.1198/073500102753410444.
9. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation*, 1997, vol.9, no.8, pp.1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
10. Hornik K. Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural networks*, 1991, vol.4, no.2, pp.251-257. DOI: 10.1016/0893-6080(91)90009-T.
11. Kisswani K. M., Elian M. I. Analyzing the (a) symmetric impacts of oil price, economic policy uncertainty, and global geopolitical risk on exchange rate. *The Journal of Economic Asymmetries*, 2021, vol.24, article e00204. DOI: 10.1016/j.jeca.2021.e00204.

12. Krogh A., Vedelsby J. Neural network ensembles, cross validation, and active learning. *Advances in neural information processing systems*, 1994, vol.7, pp.1-8.
13. Kuan C. M. Artificial neural networks. IEAS Working Paper, 2006, no.06-A010, pp.1-18.
14. Kuan C. M., Liu T. Forecasting exchange rates using feedforward and recurrent neural networks. *Journal of Applied Econometrics*, 1995, vol.10, no.4, pp.347-364. DOI: 10.1002/jae.3950100403.
15. Meese R. A., Rose A. K. An empirical assessment of non-linearities in models of exchange rate determination. *The Review of Economic Studies*, 1991, vol.58, no.3, pp.603-619. DOI: 10.2307/2298014.
16. Shulgin A. Sterilized interventions in the form of foreign currency repos: VECM analysis using Russian data. *Russian Journal of Money and Finance*, 2018, vol.77, no.2, pp.68-80. DOI: 10.31477/rjmf.201802.68.
17. Theiler J., Prichard D. Constrained-realization Monte-Carlo method for hypothesis testing. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1996, vol.94, no.4, pp.221-235. DOI: 10.1016/0167-2789(96)00050-4.
18. Wang S., Wang Q., Zhao J. Deep neural networks for choice analysis: Extracting complete economic information for interpretation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, vol.118, article 102701, pp.1-39. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102701.

### About the authors

*Andrey V. Polbin*, ORCID 0000-0003-4683-8194, Cand. Sci. (Econ.), Head of the Center for Mathematical Modeling of Economic Processes, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; Gaidar Institute for Economic Policy, Moscow, Russia, apolbin@ranepa.ru

*Margarita A. Kropocheva*, ORCID 0000-0001-5069-7094, Junior Researcher of the Center for Mathematical Modeling of Economic Processes, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia, kropocheva-ma@ranepa.ru

Received 24.06.2022, reviewed 15.07.2022, accepted 18.08.2022

## Подписка-2022

Журнал «Прикладная информатика / Journal of Applied Informatics»  
выходит 6 раз в год:

Январь Март Май Июль Сентябрь Ноябрь

### Подписка через редакцию

Стоимость подписки на 2022 год:

1 номер – 1190 руб. 3 номера – 3570 руб. 6 номеров – 7140 руб.

Подписку можно оформить с любого месяца.

Тел./факс: +7 (495) 663-93-88 (доб. 33-04)

Руководитель службы маркетинга А. А. Розанцев,  
тел. +7 (495) 987-43-74 (доб. 33-04), e-mail: arozantsev@synergy.ru

### Подписка на почте

По объединенному каталогу «Газеты и журналы»	индекс 88060
По каталогу российской прессы «Почта России»	индекс п1967
По каталогу агентства «Урал Пресс»	индекс 20497

Доставка осуществляется заказной бандеролью с уведомлением.

**Электронный выпуск, а также отдельные статьи журнала можно приобрести на сайтах [www.appliedinformatics.ru](http://www.appliedinformatics.ru), [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru) и [www.litres.ru](http://www.litres.ru)**

К оплате принимаются все виды электронных платежей, банковские карты.

Учредитель и издатель  
Негосударственное образовательное частное учреждение высшего образования  
«Московский финансово-промышленный университет «Синергия»  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57869 от 25.04.2014 г.  
Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Литературный редактор и корректор Ю. А. Голоперова  
Дизайн макета Б. В. Зипунов  
Верстка И. Н. Глазунова

**Адрес редакции и издателя**

129090, Москва, ул. Мещанская, д. 9/14, стр. 1 (юрид.)  
125190, Москва, Ленинградский пр-т, д. 80, корпус Г  
Тел.: +7 (495) 987-43-74 (доб. 33-04),  
e-mail: cvlasova@synergy.ru; www.appliedinformatics.ru

**Наши реквизиты**

Университет «Синергия»  
ИНН 7729152149  
КПП 770201001  
ОГРН 1037700232558  
Р/с 40703810338180120073  
БИК 044525225  
К/с 3010181040000000225  
Сбербанк России (ПАО) Вернадское ОСБ

При перепечатке и цитировании материалов ссылка на журнал «Прикладная информатика / Journal of Applied Informatics» обязательна. Редакция не несет ответственности за достоверность информации, опубликованной в рекламных объявлениях. Мнения авторов и редакции могут не совпадать.

© Университет «Синергия»  
Подписано в печать: 25.08.2022

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «САМ ПОЛИГРАФИСТ»  
129090, г. Москва, Протопоповский пер., д. 6