

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ, ТЕХНИКЕ, ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 3 (47)

2023

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Агашин А. В., Уразгалиев В. Ш.

АНАЛИЗ ТЕМПОВ ЭКОНОМИЧЕСКОГО

РОСТА г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА:

ОТРАСЛЕВАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА5

Бабкин А. В., Батукова Л. Р.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МНОГОМЕРНОГО

СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА

УСТОЙЧИВОГО ESGC-РАЗВИТИЯ КИБЕРСОЦИАЛЬНОЙ

ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ КЛАСТЕРНОГО ТИПА17

Дорожкина И. П., Череповицына А. А.

КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ, ХРАНЕНИЯ

И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ CO₂: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ФОРМ РЕАЛИЗАЦИИ38

Толстых Т. О., Шмелева Н. В., Супруненко И. Г., Курошев И. С.

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА КАК ЭКОСИСТЕМНЫЙ ИНТЕГРАТОР

ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ПОВЫШЕНИЯ

РЕСУРСНОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ53

Шинкевич А. И., Кудрявцева С. С., Харитонов Д. В. ТЕОРИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	70
--	----

РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Павликов А. Е., Городничев М. Г. ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА.....	81
---	----

Зыков С. В., Золотухин С. А., Золотухина М. А. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОВОГО УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ В СОСТОЯНИИ МНОГОПОТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	98
--	----

Крымский В. В., Головенко В. Р. ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ТУШЕНИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ	115
---	-----

Финогеев А. А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И НЕЙРОННОЙ СЕТИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА КРИТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ.....	125
---	-----

Кревский М. И., Бождай А. С. СЛОЖНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ МОДЕЛИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ	142
--	-----

Митрошин А. Н., Нестеров С. А., Геращенко С. М., Ксенофонтов М. А. СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ОСТЕОИНТЕГРАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ВСПЕНИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	155
---	-----

Кузнецова О. Ю., Кузнецов Р. Н., Кузьмин А. В. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ STREAMLIT	167
---	-----

MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS, TECHNOLOGY, NATURE AND SOCIETY

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3 (47)

2023

CONTENT

SECTION 1. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

Agashin A.V., Urazgaliev V.S.

ANALYSIS OF THE RATES OF ECONOMIC
GROWTH IN THE CITY OF SAINT PETERSBURG:
INDUSTRY STRUCTURE AND DYNAMICS.....5

Babkin A.V., Batukova L.R.

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF MULTIDIMENSIONAL
SYSTEM MODELING OF THE MECHANISM OF SUSTAINABLE
ESGC DEVELOPMENT OF A CLUSTER-TYPE CYBERSOCIAL
INDUSTRIAL ECOSYSTEM17

Dorozhkina I.P., Cherepovitsyna A.A.

COMPLEX OF TECHNOLOGIES FOR CARBON CAPTURE,
UTILIZATION AND STORAGE: THEORY AND PRACTICE
OF ORGANIZATIONAL FORMS OF IMPLEMENTATION.....38

Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Suprunenko I.G., Kuroshev I.S.

A DIGITAL PLATFORM AS AN ECOSYSTEM INTEGRATOR
FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES IN THE AREA
OF RESOURCE AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY.....53

<i>Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Kharitonov D.V.</i>	
THEORY OF LIMITS IN THE FUNCTIONING OF SCIENTIFIC AND PRODUCTION ENTERPRISES	70

SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

<i>Pavlikov A.E., Gorodnichev M.G.</i>	
OVERVIEW OF TECHNOLOGIES FOR DETERMINING THE POSITION OF THE HUMAN BODY	81
<i>Zykov S.V., Zolotukhin S.A., Zolotukhina M.A.</i>	
DEVELOPMENT OF A METHOD AND DEFINITION OF A NEW TRAFFIC SAFETY CONDITION IN A MULTITHREADING STATE BASED ON MATHEMATICAL MODELING	98
<i>Krymsky V.V., Golovenko V.R.</i>	
FEATURES OF CONTROL WHEN EXTINGUISHING AIRCRAFT BY FIRE DEPARTMENTS	115
<i>Finogeev A.A.</i>	
INTELLIGENT ANALYSIS OF SENSORY DATA BASED ON FUZZY LOGIC AND NEURAL NETWORK IN CRITICAL EVENT MONITORING SYSTEMS.....	125
<i>Krevskiy M.I., Bozhday A.S.</i>	
COMPLEX EMBEDDINGS OF BUSINESS PROCESSES IN THE CLASSIFICATION PROBLEM	142
<i>Mitroshin A.N., Nesterov S.A., Gerashchenko S.M., Ksenofontov M.A.</i>	
METHOD FOR INCREASING OSSEOINTEGRATION OF MEDICAL EQUIPMENT BASED ON LASER FOAMING OF METAL SURFACES	155
<i>Kuznetsova O.Yu., Kuznetsov R.N., Kuzmin A.V.</i>	
INVESTIGATION MACHINE LEARNING MODEL USING STREAMLIT	167

Раздел 1

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Section 1

MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 338
doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-1

АНАЛИЗ ТЕМПОВ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА: ОТРАСЛЕВАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА

А. В. Агашин¹, В. Ш. Уразгалиев²

^{1, 2} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
¹ smashk379@gmail.com, ² uvsh54@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Экономический рост г. Санкт-Петербурга является результатом повышения производительности труда и удельного веса высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом региональном продукте (ВРП) (до 45 % к 2035 г.), развития приоритетных отраслей промышленности региона, а также применения различных инструментов стимулирования социально-экономического роста. В предшествующие годы наметилась тенденция к замедлению темпов экономического роста в г. Санкт-Петербурге, что может свидетельствовать о недостижении заявленных в стратегических документах целей и задач, а также неэффективности применяемых инструментов развития города. Целью данной работы является исследование динамики валового регионального продукта г. Санкт-Петербурга для выявления имеющихся тенденций в его динамике и направлений стимулирования регионального развития. *Материалы и методы.* В ходе исследования была проанализирована динамика ВРП г. Санкт-Петербурга за период 1998–2020 гг. с использованием различных статистических приемов и методов, в том числе применялся регрессионный анализ и исследовалась гипотеза о стационарности временного ряда (ADF-тест) динамики ВРП и ВРП на душу населения в г. Санкт-Петербурге, применялось рейтингование регионов для определения места г. Санкт-Петербурга среди регионов РФ по уровню жизни населения (ВРП и ВРП на душу). Методологической основой исследования выступили общенаучные (синтез, индукция, дедукция) и специальные методы экономического анализа (логический и статистический анализ), в работе приведена методология системного анализа, а также использован сравнительный метод при сопоставлении региональных рейтингов по уровню экономического роста, применены эконометрические методы анализа стационарности динамики ВРП г. Санкт-Петербурга. *Результаты.* Темпы экономического роста в 1998–2020 гг. имели тенденцию к снижению, заметно снижение позиций г. Санкт-Петербурга в рейтинге регионов по показателю

© Агашин А. В., Уразгалиев В. Ш., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВРП на душу населения, темпы экономического роста ниже, чем в Прогнозе социально-экономического развития Санкт-Петербурга до 2035 года, что свидетельствует о недостаточно эффективном стимулировании социально-экономического развития региона. *Выводы.* Необходим поиск новых точек роста экономики региона и их последующего стимулирования, реализации структурной экономической политики с упором на развитие высокотехнологичных и наукоемких отраслей, что в будущем может способствовать достижению высоких устойчивых темпов экономического роста не менее 5 % ежегодно.

Ключевые слова: валовой региональный продукт, экономический рост, уровень жизни, развитие региона, экономика Санкт-Петербурга

Благодарности: отдельная благодарность выражается Е. М. Коростышевской за сформированный интерес к проведению региональных экономических исследований и содействие в публикации исследования, И. Р. Туляковой за авторский курс по экономике г. Санкт-Петербурга.

Для цитирования: Агашин А. В., Уразгалиев В. Ш. Анализ темпов экономического роста г. Санкт-Петербурга: отраслевая структура и динамика // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 5–16. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-1

ANALYSIS OF THE RATES OF ECONOMIC GROWTH IN THE CITY OF SAINT PETERSBURG: INDUSTRY STRUCTURE AND DYNAMICS

A.V. Agashin¹, V.S. Urazgaliev²

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

¹smashk379@gmail.com, ²uvsh54@yandex.ru

Abstract. Background. The economic growth of Saint Petersburg is the result of an increase in labor productivity and the share of high-tech and knowledge-intensive industries in the gross regional product (up to 45 % by 2035), the development of priority industries in the region, as well as the use of various tools to stimulate socio-economic growth. In previous years, there has been a trend towards a slowdown in economic growth in Saint Petersburg, which may indicate the failure to achieve the goals and objectives stated in the strategic documents, as well as the inefficiency of the applied tools for the development of the city. The purpose of this work is to study the dynamics of the gross regional product of Saint Petersburg in order to identify existing trends in its dynamics. *Materials and methods.* During the study, the dynamics of the GRP of Saint Petersburg for the period 1998–2020 was analyzed, using various statistical techniques and methods, including regression analysis and the hypothesis of time series stationarity (ADF-test) of the dynamics of GRP and GRP per capita in Saint Petersburg, the rating of regions was used to determine the place of Saint Petersburg among the regions of the Russian Federation in terms of the standard of living of the population (GRP and GRP per capita). The methodological basis of the study was general scientific (synthesis, induction, deduction) and special methods of economic analysis (logical and statistical analysis), the work presents the methodology of system analysis, and also uses a comparative method when comparing regional ratings by economic growth, applied econometric methods for analyzing stationarity dynamics of the gross regional product of Saint Petersburg. *Results.* Economic growth rates in 1998–2020 tended to decrease, there was a noticeable decrease in the positions of Saint Petersburg in the ranking of regions in terms of GRP per capita, economic growth rates are lower than in the Forecast for the socio-economic development of Saint Petersburg until 2035, which indicates insufficiently effective stimulation of the socio-economic development of the region. *Conclusions.* It is necessary to search

It is necessary to search for new growth points for the region's economy and their subsequent stimulation, the implementation of a structural economic policy with an emphasis on the development of high-tech and knowledge-intensive industries, which in the future can contribute to achieving high sustainable economic growth rates of at least 5 % annually.

Keywords: gross regional product, economic growth, standard of living, development of the region, economy of Saint Petersburg

Acknowledgments: special thanks are expressed to E. M. Korostyshevskaya for the formed interest in conducting regional economic research and assistance in publishing the study, I. R. Tulyakova for the author's course on economy of Saint Petersburg.

For citation: Agashin A.V., Urazgaliev V.S. Analysis of the rates of economic growth in the city of Saint Petersburg: industry structure and dynamics. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):5–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-1

Введение

В соответствии с Прогнозом социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 г. Целевой вариант социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 г. предполагает стабильный рост инвестиций в основной капитал с выходом на 25 % от ВРП к 2035 г., что должно способствовать большему эффекту от развития перспективных отраслей экономики, снизить долю традиционной для Санкт-Петербурга промышленности и достичь к концу 2035 г. удельного веса продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в ВРП 45 %, при росте производительности труда до 4,4 % и ежегодных темпах прироста ВРП не менее 3,2–4 % в 2018–2020 гг. и не менее 5 % после 2020 г. [2]

Достижение поставленных целей возможно при использовании конкурентных преимуществ г. Санкт-Петербурга и инструментов ускорения социально-экономического роста, мер поддержки и стимулирования экономики, разработанных для развития приоритетных отраслей, технологий и территорий [5]. При этом в соответствии со Стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г. г. Санкт-Петербург и города Санкт-Петербургской городской агломерации относятся к перспективному крупному центру экономического роста, образующему крупнейшую городскую агломерацию, которая должна обеспечивать вклад в экономический рост России в целом более 1 % ежегодно [3]. В связи с чем актуальным становится вопрос об анализе тенденции темпов экономического роста г. Санкт-Петербурга в динамике с целью подтверждения гипотезы о возможности достижения целевых показателей экономического роста г. Санкт-Петербурга с учетом характера динамики валового регионального продукта (ВРП) и ВРП на душу населения в долгосрочном периоде.

Под экономическим ростом чаще всего понимается устойчивое увеличение совокупного выпуска, а также устойчивые темпы роста выпуска на душу населения [4]. Так, американский экономист Р. Солоу считал, что постоянное совершенствование технологий и эффективное использование имеющихся

ресурсов являются определяющими факторами экономического роста на длительном отрезке времени [14]. Значительную роль научно-техническому прогрессу как фактору экономического роста уделил основатель статистического исследования экономического роста Э. Денисон, по мнению которого именно увеличение производительности факторов, прежде всего труда, ведет к техническому прогрессу и увеличению национального дохода [13]. Таким образом, на развитие технологий как фактора экономического роста неоднократно указывали многие известные исследователи, в связи с чем развитие высокотехнологичных и наукоемких отраслей в г. Санкт-Петербурге действительно может стать мощнейшим драйвером интенсивного экономического роста.

Материалы и методы

Анализ динамики валового регионального продукта г. Санкт-Петербурга был проведен с использованием официальной статистической информации, представленной в статистическом сборнике «Регионы России. Социально-экономические показатели 2021», а также по материалам Управления Федеральной службы государственной статистики по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области.

Объектом исследования является валовой региональный продукт Санкт-Петербурга и валовой региональный продукт на душу населения.

Предметом исследования является динамика валового регионального продукта и валового регионального продукта на одного жителя г. Санкт-Петербурга в контексте необходимости стимулирования социально-экономического развития региона.

В ходе исследования была проанализирована динамика ВРП г. Санкт-Петербурга за период 1998–2020 гг. с использованием различных статистических приемов и методов, в том числе применялся регрессионный анализ и исследовалась гипотеза о стационарности временного ряда (ADF-тест) динамики ВРП и ВРП на душу населения в г. Санкт-Петербурге, применялось рейтингование регионов для определения места г. Санкт-Петербурга среди регионов РФ по уровню жизни населения (ВРП и ВРП на душу).

Методологической основой исследования выступили общенаучные (синтез, индукция, дедукция) и специальные методы экономического анализа (логический и статистический анализ), в работе приведена методология системного анализа, а также использован сравнительный метод при сопоставлении региональных рейтингов по уровню экономического роста, применены эконометрические методы анализа стационарности динамики валового регионального продукта г. Санкт-Петербурга.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена динамика ВРП г. Санкт-Петербурга в период 1998–2018 гг. Средний темп роста ВРП в период с 1998 по 2018 г. составил 121,44 % ежегодно, при этом наибольший рост был замечен на раннем этапе, средний темп прироста, соответственно, равен 21,44 %, средний уровень ВРП в текущих ценах за рассматриваемый период составил 1607,8 млрд руб. Анализ тренда показал, что в среднем ВРП г. Санкт-Петербурга возрастает ежегодно на 210,06 млрд руб.

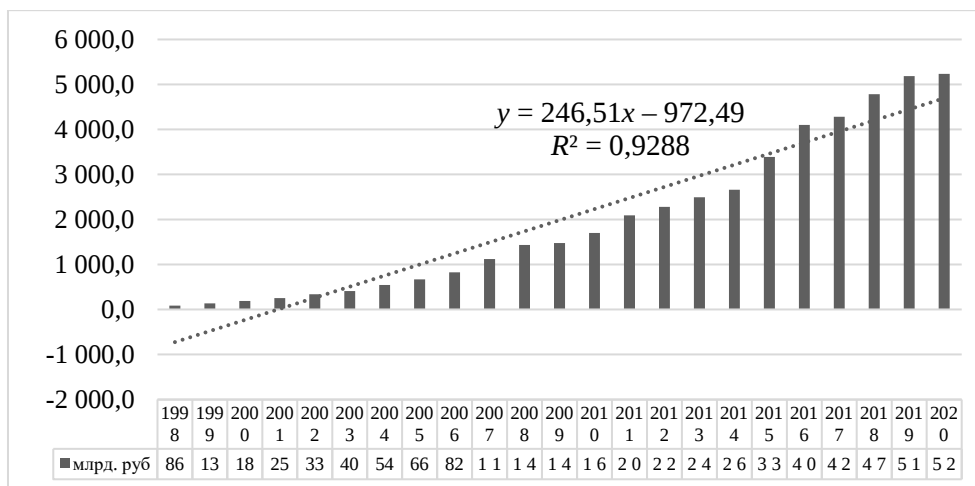


Рис. 1. Динамика валового регионального продукта г. Санкт-Петербурга в 1998–2020 гг. (в текущих ценах) (составлено авторами по данным Росстата.
URL: https://petrostat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%A1%D0%9F%D0%B1_2018.pdf;
Регионы России. Социально-экономические показатели 2021.
URL: https://gks.ru/bgd/regl/b21_14p/Main.htm)

Кроме того, исследуемый временной ряд ВРП в текущих ценах оказался стационарным в первых разностях для выбранной модели с константой и трендом ($\tau_{ct}(1) = -3,826 < DF_{\text{крит}} = -3,41$), несмотря на характерную в действительности нестационарность для динамики рядов ВВП и ВРП, однако полученный вывод о стационарности временного ряда позволяет говорить об относительной достоверности полученных расчетов.

Несмотря на положительную динамику ВРП г. Санкт-Петербурга за рассматриваемый период времени, важно также исследовать изменение темпов роста ВРП на душу населения, что позволит оценить такой показатель, как уровень жизни. На рис. 2 видно, что средний темп роста ВРП на душу населения (в текущих ценах, тыс. руб.) в 1998–2020 гг. составил 119,87 % ежегодно, средний темп прироста ВРП СПб на душу населения, соответственно, оказался равен 19,87 %, средний уровень ВРП СПб на душу населения за рассматриваемый период составил 385,7 тыс. руб. Исследуемый временной ряд ВРП г. Санкт-Петербурга на душу населения в текущих ценах оказался стационарен в первых разностях для выбранной модели с константой и трендом ($\tau_{ct}(1) = -4,167 < DF_{\text{крит}}$).

Анализ динамики ВРП и ВРП на душу населения г. Санкт-Петербурга в текущих ценах позволяет сделать вывод о том, что средний темп роста ВРП на душу населения в 1998–2020 гг. оказался ниже среднего темпа роста ВРП региона на 0,66 п.п. Наименьший прирост ВРП СПб был отмечен в период финансового кризиса 2008–2009 г. и в 2020 г., цепной темп прироста выпуска в г. Санкт-Петербурге в 2009 г. составил всего 3,07 %, в то время как цепной темп прироста ВРП на душу населения в СПб в том же году оказался равен 2,34 % (к примеру, аналогичные показатели для 2004 г. – 32,42 и 31,97 % соответственно), что явным образом свидетельствует о недостаточности использования инструментов ускорения социально-экономического роста региона и мер поддержки экономики в целях стимулирования развития перспективных высокотехнологичных и наукоемких отраслей в г. Санкт-Петербурге. Кроме

того, это подтверждает и практически нулевой темп экономического роста г. Санкт-Петербурга в 2020 г. (прирост ВРП составил только 0,96 %, а темп прироста ВРП на 1 жителя города – 0,95 %).

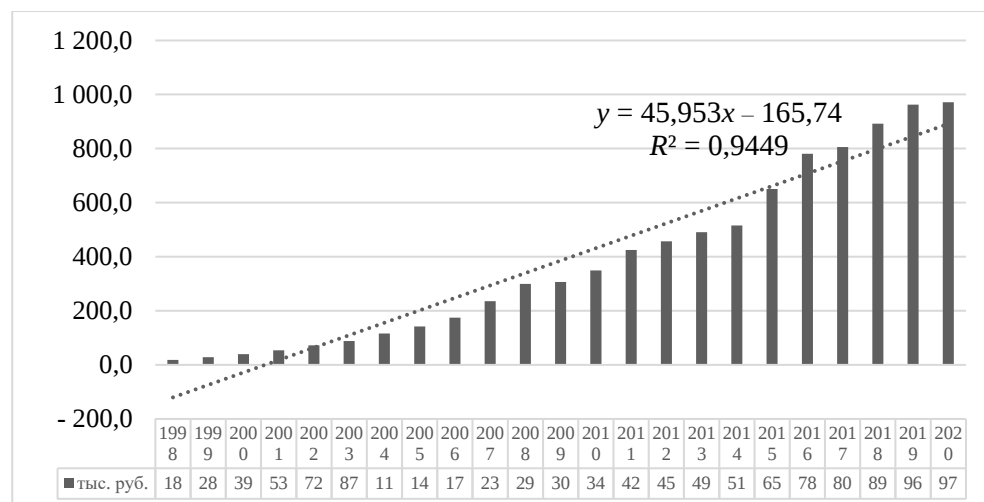


Рис. 2. Динамика валового регионального продукта г. Санкт-Петербурга в расчете на душу населения в 1998–2020 гг. (в текущих ценах) (составлено авторами по данным Росстата. URL: https://petrostat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%A1%D0%9F%D0%B1_2018.pdf; Регионы России. Социально-экономические показатели 2021. URL: https://gks.ru/bgd/regl/b21_14p/Main.htm)

В период 2015–2017 гг. позиции Санкт-Петербурга по показателям ВРП и ВРП на душу населения значительно укрепились. Так, СПб уже в 2015 г. переместился по показателю ВРП с четвертого места на второе в общероссийском рейтинге (табл. 1), обогнав своих главных конкурентов – ХМАО и Московскую область.

Таблица 1

Регионы-лидеры по величине валового регионального продукта, млрд руб. (2011–2020) (составлено авторами по данным Федеральной службы государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru>)

Год	Место СПб по величине ВРП	ВРП СПб (млрд руб., в текущих ценах)	ВРП г. Москвы (млрд руб., в текущих ценах)	ВРП ХМАО (млрд руб., в текущих ценах)	ВРП Московской области (млрд руб., в текущих ценах)
2011	4	2091,9	9948,8	2440,4	2176,8
2012	4	2280,4	10 666,9	2703,6	2357,1
2013	4	2491,4	11 814,9	2729,1	2546
2014	4	2661,2	12 779,5	2860,5	2742,9
2015	2	3387,4	13 520,9	3154,1	3180,9
2016	2	3666	14 237,8	3068,1	3662,3
2017	2	3824,6	15 688,3	3492,5	3780,1
2018	4	4193,5	17 881,5	4447,5	4201,8
2019	3	5186,1	19 797,1	4558,9	5196,1
2020	3	5235,7	19 856,7	3353,2	5265,4

По состоянию на 2018 г. Санкт-Петербург вновь занял четвертое место среди регионов РФ по величине ВРП, однако темп прироста выпуска в регионе составил 9,65 %, что свидетельствует скорее об улучшениях в темпах роста ВРП, несмотря на ухудшение позиций в рейтинге субъектов России по величине валового регионального продукта. В 2019–2020 гг. регион укрепил свои позиции в рейтинге регионов РФ по величине валового регионального продукта, заняв третье место среди субъектов РФ, однако место г. Санкт-Петербурга по уровню ВРП оказалось на одну позицию ниже, чем в 2015–2017 гг., когда регион занимал второе место по РФ в целом.

По показателю ВРП на душу населения г. Санкт-Петербург немного ниже в общероссийском рейтинге, чем по уровню ВРП. В 2014 г. г. Санкт-Петербург занимал 11 место в общероссийском рейтинге регионов с показателем 515,56 тыс. руб. на душу населения, немного уступив Республике Коми с показателем 557,64 тыс. руб. на душу населения и Тюменской области с 564,68 тыс. руб. на душу населения. Безусловными лидерами в рейтинге ВРП на душу населения в 2014–2020 гг. оставались такие регионы с аномальным по среднероссийским меркам ВРП на душу населения, как Ненецкий автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сахалинская область, Чукотский автономный округ, г. Москва и Республика Саха (Якутия), большая часть из которых специализируется на добыче полезных ископаемых и добывающих отраслях (рис. 3). В 2015–2019 гг. г. Санкт-Петербург устойчиво занимал 9 место по уровню ВРП на душу населения, а в 2020 г. опустился на 10 место, однако в абсолютном выражении ВРП на душу населения в СПб в целом вырос с 719 344,1 руб. на человека в 2017 г. до 971 158,0 руб. в 2020 г. на 251 813,9 руб. или на 35 %. Несмотря на достаточно высокие темпы роста ВРП на душу населения, заметно замедление темпов роста ВРП на одного жителя в 2012–2018 гг. и в период коронакризиса 2019–2020 гг., с небольшим ускорением темпов роста в 2018–2019 гг. в сравнении с 1998–2011 гг. (без учета кризиса 2008–2009 гг.), что может свидетельствовать о необходимости повышения экономической безопасности региона и наличии факторов, влияющих на замедление темпов экономического роста субъекта, что и влияет на ухудшение позиций в рейтинге регионов по показателю ВРП на душу населения.

Заключение

С целью стимулирования социально-экономического роста г. Санкт-Петербурга необходимо осуществлять развитие приоритетных отраслей и технологий, повышать долю высокотехнологичной и наукоемкой продукции в ВРП с 30 % до не менее чем 43–45 %. Для этого, в первую очередь, необходимо правильно определить точки роста, грамотно реализуя структурную политику в сочетании с разработанными инструментами и методами для стимулирования экономического развития.

Как отмечают некоторые авторы [7], разработка и создание высокотехнологичной и наукоемкой продукции является достаточно длительным процессом, кроме того, в процессе деятельности предприятий наукоемких отраслей возможна технологическая инфляция, при которой происходит обесценивание предыдущих технологий и, как следствие, недоиспользование потенциала НИОКР. Данная проблема требует стимулирования со стороны государства

спроса на продукцию наукоемких отраслей [7], а также разработки инструментов такого стимулирования и их наличие в Стратегии социально-экономического развития региона.

2014	Регион	ВРП на душу населения, рублей (в текущих ценах)	2015	Регион	ВРП на душу населения, рублей (в текущих ценах)
Ненецкий авт. округ		4 329 031,1	Ненецкий авт. округ		5 210 143,9
Ямало-Ненецкий авт. округ		3 025 745,6	Ямало-Ненецкий авт. округ		3 336 453,4
Ханты-Мансийский авт. округ-Югра		1 782 617,7	Ханты-Мансийский авт. округ-Югра		1 947 653,2
Сахалинская область		1 631 919,0	Сахалинская область		1 716 734,4
Чукотский автономный округ		1 142 504,1	Чукотский автономный округ		1 226 152,0
г. Москва		1 051 559,6	г. Москва		1 102 496,4
Республика Саха (Якутия)		688 540,1	Магаданская область		854 561,5
Магаданская область		649 745,4	Республика Саха (Якутия)		780 139,8
Тюменская область		564 680,5	г. Санкт-Петербург	9	650 339,7
Республика Коми		557 641,3	Тюменская область		628 098,5
г. Санкт-Петербург	11	515 556,9	Республика Коми		613 975,0
Красноярский край		493 985,7	Красноярский край		582 345,8
2016	Регион	ВРП на душу населения, рублей (в текущих ценах)	2017	Регион	ВРП на душу населения, рублей (в текущих ценах)
Ненецкий авт. округ		5 806 862,4	Ненецкий авт. округ		5 886 863,0
Ямало-Ненецкий авт. округ		3 785 451,6	Ямало-Ненецкий авт. округ		4 566 463,4
Ханты-Мансийский авт. округ-Югра		1 874 919,6	Ханты-Мансийский авт. округ-Югра		2 115 943,2
Сахалинская область		1 536 359,9	Сахалинская область		1 573 868,5
Чукотский автономный округ		1 354 367,7	Чукотский автономный округ		1 376 275,1
г. Москва		1 152 350,9	г. Москва		1 260 754,5
Магаданская область		1 016 642,8	Магаданская область		1 082 847,8
Республика Саха (Якутия)		897 460,4	Республика Саха (Якутия)		951 330,0
г. Санкт-Петербург	9	697 806,1	г. Санкт-Петербург	9	719 344,1
Республика Коми		641 525,0	Тюменская область		691 464,7
Камчатский край		624 774,2	Республика Коми		680 670,8
Тюменская область		624 651,6	Красноярский край		660 393,9
2018	Регион	ВРП на душу населения, рублей (в текущих ценах)	2019	Регион	ВРП на душу населения, рублей (в текущих ценах)
Ненецкий авт. округ		7 296 374,4	Ненецкий авт. округ		7 527 837,4
Ямало-Ненецкий авт. округ		5 650 999,3	Ямало-Ненецкий авт. округ		5 817 780,0
Ханты-Мансийский авт. округ-Югра		2 715 827,8	Ханты-Мансийский авт. округ-Югра		2 731 117,6
Сахалинская область		2 517 125,0	Сахалинская область		2 397 445,2
Чукотский автономный округ		1 685 134,1	Чукотский автономный округ		1 900 850,8
г. Москва		1 494 938,0	г. Москва		1 565 396,3
Магаданская область		1 236 274,4	Магаданская область		1 524 002,3
Республика Саха (Якутия)		1 166 833,3	Республика Саха (Якутия)		1 266 298,6
г. Санкт-Петербург	9	891 448,8	г. Санкт-Петербург	9	962 001,8
Тюменская область		872 684,2	Красноярский край		939 382,4
Камчатский край		835 029,8	Камчатский край		889 982,3
Республика Коми		833 270,1	Республика Коми		870 097,8
2020	Регион	ВРП на душу населения, рублей (в текущих ценах)			
Ненецкий авт. округ		5 206 287,1			
Ямало-Ненецкий авт. округ		5 072 483,6			
Чукотский автономный округ		2 404 271,2			
Сахалинская область		2 059 206,5			
Магаданская область		2 035 007,0			
Ханты-Мансийский авт. округ-Югра		1 994 630,3			
г. Москва		1 567 644,8			
Республика Саха (Якутия)		1 168 152,5			
Мурманская область		1 072 337,1			
г. Санкт-Петербург	10	971 158,0			
Красноярский край		951 613,7			
Камчатский край		942 802,0			

Рис. 3. Место г. Санкт-Петербурга в рейтинге регионов по уровню ВРП на душу населения в 2014–2020 гг. (составлено авторами по данным Федеральной службы государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru>)

По официальным данным Управления Федеральной службы государственной статистики по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области, в период с 2017 по 2018 г. в структуре ВРП г. Санкт-Петербурга заметно повысилась доля обрабатывающих производств – с 16,9 до 17,2 % ВРП соответственно, при этом значительным образом снизился индекс физического объема ВРП в сельском, лесном хозяйстве, охоте, рыболовстве и рыбоводстве –

со 101,7 % в 2017 г. до 85,8 % в 2018 г. С другой стороны, возросла доля обрабатывающих производств (до 17,2 % ВРП СПб), при этом в абсолютном выражении ВРП от обрабатывающих производств с 2016 по 2018 г. вырос с 615 149 млн руб. до 721 126 млн руб. Индекс физического объема для добычи полезных ископаемых увеличился до 120,2 % [11] и продемонстрировал самый высокий показатель среди всех показателей индексов физического объема, вклад Санкт-Петербурга в формирование ВРП Северо-Западного федерального округа (доля СЗФО в ВРП РФ 10,6 %) в 2018 г. составил 46,5 %, что является весьма приличным значением. По суммарной величине ВРП по субъектам РФ на долю СПб в 2018 г. пришлось только 5,3 %, а годом ранее аналогичный показатель оказался на 0,1 п.п. больше и составил 5,4 %. Таким образом, в последнее время наметилась тенденция к снижению доли ВРП Санкт-Петербурга в суммарном ВРП по регионам России, что свидетельствует также и о тенденции к снижению ежегодного вклада г. Санкт-Петербурга в экономический рост России, данная проблема может усиливаться в связи с коронакризисом и пандемией COVID-2019, а также отсутствием эффективных инструментов стимулирования экономического развития региона в текущей Стратегии социально-экономического развития г. Санкт-Петербурга.

Выявленные тенденции позволяют, с одной стороны, сделать вывод о возможности достижения целевых показателей экономического роста г. Санкт-Петербурга с учетом характера динамики валового регионального продукта на душу населения, с другой стороны, как показали результаты анализа, темпы роста ВРП на душу населения г. Санкт-Петербурга после 2012 г. оказались ниже, чем в предшествующий период, и устойчиво находятся в диапазоне 3–10 % ежегодно (за исключением 2015–2016 гг.), что свидетельствует о необходимости поиска новых точек роста экономики региона и их последующего стимулирования, пересмотра структуры экономики города с целью обеспечения одновременного достижения высоких устойчивых темпов экономического роста (более 5 % ежегодно по целевому сценарию развития) и развития высокотехнологичных и наукоемких отраслей как базиса для дальнейшего роста, а также реализации «проактивной» политики в управлении региональным развитием. Высокотехнологичный комплекс (ВТК) и темпы его развития во многом влияют как на саму политику региональных властей, так и на социально-экономическое развитие субъектов, устойчиво высокая инновационная активность предприятий региона возможна преимущественно благодаря активному стимулированию инноваций со стороны государства [8]. Кроме того, увеличение доли ВТК и наукоемких отраслей в структуре экономики позволяет региону влиять на национальную экономику и мировой рынок в целом, а также способствовать укреплению экономической безопасности региона [6, 8]. Отличительным примером успешного стимулирования регионального роста является Калужская область, ВРП которой в 2013–2016 гг. вырос с 292 841 млн руб. до 373 403,5 млн руб. или на 27,51 %, что произошло благодаря выделению точек роста региона и развитию кластеров – от фармацевтического кластера и автомобилестроения до Обнинского кластера науки и образования [5]. Данные достижения стали возможны благодаря значительному росту государственного финансирования территорий с наиболее высоким научно-техническим и производственным потенциалом, что привело к высоким темпам экономического роста и увеличению объема высокотехнологичной и наукоемкой продукции в экономике региона, а также увеличению числа кадров, задействованных в отраслях экономической специализации региона.

Полученные результаты проведенного исследования экономического развития г. Санкт-Петербурга могут быть использованы для корректировки и актуализации действующей Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 г. в части целевых показателей и направлений развития субъекта.

Список литературы

1. Стратегия социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 г. URL: <https://cedipt.gov.spb.ru/strategicheskoe-planirovanie/strategiya-2035/> (дата обращения: 10.08.2023).
2. Прогноз социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456043899> (дата обращения: 10.08.2023).
3. Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/a3d075aa813dc01f981d9e7fcb97265f/130219_207-p.pdf (дата обращения: 10.08.2023).
4. Бланшар О. Макроэкономика : учебник. 2-е изд. М. : Издательский дом Высшей школы экономики, 2015. 672 с.
5. Коростышевская Е. М., Габитов А. Ф. Региональная экономическая политика России в условиях глобализации. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. 206 с.
6. Уразгалиев В. Ш. Экономическая безопасность : учебник и практикум для вузов. М. : Юрайт, 2018. 374 с.
7. Абрашкин М. С. Наукоемкость и инновационное развитие предприятий машиностроения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Экономика. 2018. № 4.
8. Коростышевская Е. М., Николаева Т. П. Инновационный потенциал России и условия его развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2007. № 1.
9. Румянцев С. Ю. Инновации и экономическое поведение в современных моделях экономического роста и в эволюционной экономике // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Экономика и менеджмент. 2015. № 2.
10. Валовой региональный продукт г. Санкт-Петербурга. URL: https://petrostat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%A1%D0%9F%D0%B1_2018.pdf (дата обращения: 10.08.2023).
11. Регионы России. Социально-экономические показатели 2021. URL: https://gks.ru/bgd/regl/b21_14p/Main.htm (дата обращения: 10.08.2023).
12. Управление Федеральной службы государственной статистики по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области. URL: <https://petrostat.gks.ru/> (дата обращения: 10.08.2023).
13. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 10.08.2023).
14. Denison E. F. Why Growth Rates Differ; postwar Experience in Nine Western Countries. Washington : Brookings Institution, 1967. XII p. 494 p.
15. Solow R. M. A Contribution to the Theory of Economic Growth // The Quarterly Journal of Economics. 1956. Vol. 70, № 1. P. 65–94.

References

1. *Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Sankt-Peterburga na period do 2035 g. = Strategy of socio-economic development of Saint Petersburg for the period up to 2035.* (In Russ.). Available at: <https://cedipt.gov.spb.ru/strategicheskoe-planirovanie/strategiya-2035/> (accessed 10.08.2023).

2. *Prognoz sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Sankt Peterburga na period do 2035 goda* = *Forecast of socio-economic development of Saint Petersburg for the period up to 2035*. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456043899> (accessed 10.08.2023).
3. *Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2025 g.* = *Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025*. (In Russ.). Available at: https://www.economy.gov.ru/material/file/a3d075aa813dc01f981d9e7fcb97265f/130219_207-p.pdf (accessed 10.08.2023).
4. Blanshar O. *Makroekonomika: uchebnik. 2-e izd.* = *Macroeconomics : textbook. 2nd ed.* Moscow: Izdatel'skiy dom Vysshey shkoly ekonomiki, 2015:672. (In Russ.)
5. Korostyshevskaya E.M., Gabitov A.F. *Regional'naya ekonomicheskaya politika Rossii v usloviyakh globalizatsii* = *Regional economic policy of Russia in the context of globalization*. Penza: Izd-vo PGU, 2019:206. (In Russ.)
6. Urazgaliev V.Sh. *Ekonomicheskaya bezopasnost': uchebnik i praktikum dlya vuzov* = *Economic security : textbook and workshop for universities*. Moscow: Yurayt, 2018:374. (In Russ.)
7. Abrashkin M.S. Science intensity and innovative development of machine-building enterprises. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta Ser.: Ekonomika* = *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser.: Economics*. 2018;(4). (In Russ.)
8. Korostyshevskaya E.M., Nikolaeva T.P. Innovative potential of Russia and conditions of its development. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika* = *Bulletin of Saint Petersburg University. Economy*. 2007;(1). (In Russ.)
9. Rumyantseva S.Yu. Innovations and economic behavior in modern models of economic growth and in evolutionary economics. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika i menedzhment* = *Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Economics and Management*. 2015;(2). (In Russ.)
10. *Valovoy regional'nyy produkt g. Sankt-Peterburga* = *Gross regional product of Saint Petersburg*. (In Russ.). Available at: https://petrostat.gks.ru/storage/mediabank/%D0%A1%D0%9F%D0%B1_2018.pdf (accessed 10.08.2023).
11. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli 2021* = *Regions of Russia. Socio-economic indicators 2021*. (In Russ.). Available at: https://gks.ru/bgd/regl/b21_14p/Main.htm (accessed 10.08.2023).
12. *Upravlenie Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po g. Sankt-Peterburgu i Leningradskoy oblasti* = *Department of the Federal State Statistics Service for Saint Petersburg and the Leningrad region*. (In Russ.). Available at: <https://petrostat.gks.ru/> (accessed 10.08.2023).
13. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* = *Federal State Statistics Service*. (In Russ.). Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 10.08.2023).
14. Denison E.F. *Why Growth Rates Differ; postwar Experience in Nine Western Countries*. Washington: Brookings Institution, 1967;XII:494.
15. Solow R.M. A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*. 1956;70(1):65–94.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Вячеславович Агашин
магистрант кафедры экономической
теории и экономической политики,
Санкт-Петербургский
государственный университет
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Университетская наб., 7/9)
E-mail: smashk379@gmail.com

Andrei V. Agashin
Master degree student of the sub-department
of economic theory and economic policy,
Saint Petersburg State University
(7/9 Universitetskaya emb.,
Saint Petersburg, Russia)

Владимир Шайхатович Уразгалиев

кандидат экономических наук,
доцент кафедры экономической теории
и экономической политики,
Санкт-Петербургский
государственный университет
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Университетская наб., 7/9)
E-mail: uvsh54@yandex.ru

Vladimir S. Urazgaliev

Candidate of economical sciences, associate
professor of the sub-department
of economic theory and economic policy,
Saint Petersburg State University
(7/9 Universitetskaya emb.,
Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.07.2022

Поступила после рецензирования/Revised 18.03.2023

Принята к публикации/Accepted 28.03.2023

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МНОГОМЕРНОГО СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА УСТОЙЧИВОГО ESGC-РАЗВИТИЯ КИБЕРСОЦИАЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ КЛАСТЕРНОГО ТИПА

А. В. Бабкин¹, Л. Р. Батукова²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹ Babkin@spbstu.ru, ² malilu@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* С начала XXI в. мировая система финансово-экономических и хозяйственных отношений объективно эволюционирует в направлении формирования постиндустриального интегрального киберинформационного способа производства. Это служит основанием говорить о наступлении эпохи Интегрального киберинформационного общества. Сложность задач, которые предстоит решить государству и обществу в ходе наступающих перемен, требует новых подходов к организации промышленности, в том числе на основе применения киберсоциальных промышленных экосистем и механизмов устойчивого ESGC-развития. Цель исследования – разработка в системной парадигме концептуальных основ механизма устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа, а также обоснование необходимости многомерного системного моделирования данного механизма для конструирования его релевантного цифрового образа. *Материалы и методы.* Исследование проводилось в системной парадигме, основывающейся на теории систем и системном подходе. Для исследования причин исторических эволюционных изменений экономико-хозяйственных механизмов использованы общенаучные методы анализа и синтеза, инструментарий системно-организационного анализа. В ходе анализа фактического материала и для изложения результатов применен метод структурно-логического моделирования и визуализации концептуальных основ экономико-хозяйственных систем. *Результаты.* Были определены модель организационного механизма киберсоциального промышленного кластера, определяющая концептуальную суть многомерного системного моделирования механизма устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа; концепция нового, инженерного подхода к конструированию и моделированию киберсоциальных промышленных экосистем кластерного типа с опорой на теоретико-методологический базис системной парадигмы. *Выводы.* Предложенные концептуальные основы многомерного системного моделирования механизма устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа будут способствовать развитию экономики цифровой промышленности и повышению ее эффективности.

Ключевые слова: промышленная экосистема, промышленный кластер, устойчивое ESGC-развитие, моделирование экономических систем, цифровая трансформация, цифровая платформа, цифровой образ, акселерация инновационных процессов

Финансирование: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-28-01316 «Стратегическое управление эффективным устойчивым ESG-развитием многоуровневой киберсоциальной промышленной экосистемы»

кластерного типа в циркулярной экономике на основе концепции Индустрия 5.0: методология, инструментарий, практика» (URL: <https://rscf.ru/project/23-28-01316>).

Для цитирования: Бабкин А. В., Батукова Л. Р. Концептуальные основы многомерного системного моделирования механизма устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 17–37. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-2

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF MULTIDIMENSIONAL SYSTEM MODELING OF THE MECHANISM OF SUSTAINABLE ESGC DEVELOPMENT OF A CLUSTER-TYPE CYBERSOCIAL INDUSTRIAL ECOSYSTEM

A.V. Babkin¹, L.R. Batukova²

¹ Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ Babkin@spbstu.ru, ² malilu@yandex.ru

Abstract. Background. Since the beginning of the 21st century, the world system of financial, economic and economic relations has been objectively evolving towards the formation of a post-industrial integral cyber-formation production method. This serves as a basis for talking about the onset of the era of the eponymous Integral Cyber Formation Society. The complexity of the tasks to be solved by the state and society in the course of the upcoming changes requires new approaches to organizing industry, including the use of cyber-social industrial ecosystems and mechanisms for sustainable ESGC development. The purpose of the study is to develop in the system paradigm the conceptual foundations of the mechanism of sustainable ESGC-development of the cluster-type cybersocial industrial ecosystem, as well as the justification of the need for multidimensional system modeling of this mechanism for the design of its relevant digital image. *Materials and methods.* The study was conducted in a system paradigm based on system theory and a system approach. To study the causes of historical evolutionary changes in economic and economic mechanisms, general scientific methods of analysis and synthesis, and system-organizational analysis tools were used. During the analysis of the actual material and to present the results, the method of structural and logical modeling and visualization of the conceptual foundations of economic and economic systems was used. *Results.* The main results are: a model of the organizational mechanism of the cybersocial industrial cluster, which determines the conceptual essence of the multidimensional system modeling of the mechanism of sustainable ESGC-development of the cybersocial industrial ecosystem of the cluster type; the concept of a new, engineering approach to the design and modeling of cluster-type cybersocial industrial ecosystems based on the theoretical and methodological basis of the system paradigm. *Conclusions.* The proposed conceptual foundations of multidimensional system modeling of the mechanism of sustainable ESGC-development of a cluster-type cybersocial industrial ecosystem will contribute to the development of the digital industry economy and increase its efficiency.

Keywords: industrial ecosystem, industrial cluster, sustainable ESGC development, modeling of economic systems, digital transformation, digital platform, digital image, acceleration of innovation processes

Acknowledgements: the research was carried out with funds from a grant from the Russian Scientific Foundation № 23-28-01316 "Strategic management of effective sustainable ESG development of a multi-level cyber-social industrial ecosystem cluster type in a circular

economy based on the concept of Industry 5.0: methodology, tools, practice" (URL: <https://rscf.ru/project/23-28-01316>).

For citation: Babkin A.V., Batukova L.R. Conceptual foundations of multidimensional system modeling of the mechanism of sustainable ESGC development of a cluster-type cybersocial industrial ecosystem. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):17–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-2

Введение

Актуальность. Сегодня мы являемся свидетелями глобальных системных изменений экономики и общества. Они вызваны переходом от стремительно сдающего свои позиции и архаизирующегося Позднеиндустриального общества (ПИФ-общества) к новой цивилизационной эпохе – к Интегральному киберинформационному обществу (Интегральное КИФ-общество¹).

В основе нового способа производства лежит принципиально новый конкретно-исторический тренд² гиперфункции научно-технологического прогресса общества (НТПО), базирующийся на принципе комплексной «цифровизации, интеллектуализации, кибернетизации» всей экономико-хозяйственной сферы. Для последней это означает переход на новые основы экономического роста.

Процесс перехода сопровождается глубокими трансформациями всех общественных систем. Генератором изменений является промышленный экономико-хозяйственный механизм страны. Ядром же, где должен сформироваться и отточиться *интегральный киберинформационный способ производства*, должен стать конгломерат сопряженных киберсоциальных промышленных экосистем кластерного типа.

Предпосылки перехода от ПИФ-общества к киберинформационному обществу (КИФ-обществу) активно формировались начиная с последней четверти XX в. Важнейшим индикатором формирования предпосылок является зарождение концепции устойчивого ESG-развития корпорации³. Концепция возникла к концу XX в. на волне нарастания социальных и экологических проблем, с которыми государство и общество без активного, инициативного участия бизнеса справиться уже не могли. Для обеспечения макро- и микроустойчивости развития государства и общества требовалось, чтобы бизнес взял на себя значительную долю ответственности за окружающую среду и социальное оздоровление общества, в том числе за будущие поколения. В этой связи в 2000 г. государствами – членами ООН – была принята «Декларация тысячелетия», которая содержала восемь целей развития тысячелетия [6]. Принятие декларации

¹ 1) ПОФ-общество, 1650:1665–1770:1785, тренд НТПО «Механизация»; 2) РИН-общество, 1770:1785–1890:1905, тренд НТПО «Машинизация»; 3) ПИН-общество, 1890:1905–2010:2025, тренд НТПО «Автоматизация и первичная цифровизация»; 4) Интегральное КИФ-общество, 2010:2025–2130:2145, тренд НТПО «Цифровизация, интеллектуализация, кибернетизация» (футурологическое моделирование) [1–5].

² Конкретно-исторический тренд реализуется в виде S-образного тренда гиперфункции НТПО и соответствует ОКИ-типу общества. Гиперфункция НТПО предстает в виде последовательно сменяющих друг друга частных S-образных мегатрендов развития техники и технологий, служит основой формирования способа производства и образ жизни ОКИ-типу общества.

³ Environment, Social, Governance – перевести можно так: «Окружающая среда», «Общество», «Управление».

ознаменовало закрепление за концепцией устойчивого ESG-развития корпорации (далее – «устойчивое ESG-развитие») мирового, смыслообразующего статуса [7]. Последнее означало, что в рамках Западного цивилизационного проекта (ведущего на тот момент времени) на государственном уровне были приняты обязательства по склонению (а где надо и принуждению) бизнеса к участию в решении задач, напрямую с бизнесом не связанных.

Однако разработка на надгосударственном и государственном уровне механизмов и положений концепции не могла изменить коммерческую природу бизнеса. А последняя всегда требовала добиваться производства добавочного продукта для получения прибыли. Предложенные же концепцией устойчивого ESG-развития принципы взаимодействия с внешней средой, взятые в чистом виде, не содержат прямой коммерческой мотивации для бизнеса. Ожидаемо, механизмы, разрабатываемые на надгосударственном и государственном уровне в русле устойчивого ESG-развития корпораций, стали «буксовать». Однако проблемы остались и требовали своего решения.

В связи с этим сегодня на смену концепции устойчивого ESG-развития корпорации естественным образом приходит концепция устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа. Основной смысловой посыл последней – это идея интегрированного устойчивого ESG-развития предпринимательских структур на базе возможностей, которые предоставляются киберсоциальной промышленной экосистемой кластерного типа.

Литературный обзор

Представленное исследование является междисциплинарным и основывается на научных концепциях ряда школ научной мысли, а также на относительно молодых, но уже достаточно устойчивых исследовательских направлениях.

Исследованием проблем цифровой трансформации экономико-хозяйственного механизма страны и задач по формированию совместимых, отвечающих вызовам времени цифровых платформ и платформенных бизнес-моделей, способствующих акселерации инновационных процессов занимается научная школа промышленных экосистем. Школа получила свое развитие в работах следующих отечественных авторов: Г. Б. Клейнера [8], А. В. Бабкина и др. [9], В. В. Кобзева и др. [10], Л. А. Гамидуллаевой [11], Г. Я. Беяковой, Фокиной [12], И. М. Степнова, Ю. А. Ковальчук [13]. Из зарубежных ученых можно выделить Gian Quining, Ing Liu, Roger Grosvenor [14], Hans-Christian Paul, Burak Yashi, Timer Kurnac [13], J. Gabrielsson, D. Politis, A. Billström [16]. Предложенная концепция устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа призвана внести вклад в решение задач данной школы.

Сегодня крайне актуальна и широко дискутируется проблема оценки эффективности корпораций на основе ESG-концепции. Тема важна для формирования суверенной отечественной рейтинговой системы, для создания отвечающей вызовам времени системы раскрытия нефинансовой информации. Это является важным условием эффективности инвестиционных финансовых рейтингов и эконометрических моделей оценки бизнес-проектов. Данной тематике посвящены исследования многих современных авторов, в том числе это работы Д. С. Демиденко и др. [17], А. В. Бабкина и др. [20], Е. О. Вострикова, А. П. Мешкова [21] и др. Настоящее изложение содержит ряд положений, развивающих данную тематику.

Предложенное исследование опирается на методологию и методический инструментарий концепции устойчивого развития, а также на достижения ряда исследовательских направлений, вносящих свой вклад в продвижение концепции на уровень практического применения. Это работы Л. А. Гамидуллаевой и др. [20], Е. М. Коростышевской и др. [21], С. В. Ратнер [22] О. А. Канаевой [23].

На уровень самостоятельной школы научной мысли, обеспечивающей теорию и практику перехода к Интегральному КИФ-обществу, сегодня выдвинулось научно-исследовательское направление в области цифровизации систем и процессов экономико-хозяйственного механизма государства. Настоящее исследование опирается на работы данной научной школы, в том числе это работы Г. Б. Клейнера [24]; С. Ю. Глазьева [2], А. В. Бабкина и др. [25], П. Штомпка [26]; Л. Р. Батуковой [27] и других авторов.

Фундаментальным основанием системного обеспечения научного мировоззрения отечественной научной мысли являются: теория смены исторических формаций К. Маркса и разработанная на ее основе советская политэкономия; всеобщая организационная наука («Тектология» А. А. Богданова), философия космизма («Космическая философия. Живая Вселенная» К. Э. Циолковского), теория системного представления организации естественного бытия («Общая теория систем» Л. фон Берталанфи). В рамках общей теории систем сегодня сформировался: а) спектр специальных, крайне важных междисциплинарных направлений; б) системный теоретико-методологический подход к рассмотрению и моделированию объекта и предмета исследования. В совокупности весь междисциплинарный комплекс теоретико-методологических оснований и исследовательских подходов сегодня образует единую научно-мировоззренческую платформу, получившую название «системная парадигма». В развитие системной парадигмы в области социоэкономических и социотехнических систем внесли существенный вклад работы таких исследователей, как Г. Б. Клейнер [28], Я. Корнаи, А. Субетто и Н. Винер и др. Настоящая работа призвана расширить и уточнить инструментарий системной парадигмы в области организации промышленного экономико-хозяйственного механизма.

Целью настоящего исследования является разработка в системной парадигме концептуальных основ механизма устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа, а также обоснование необходимости многомерного системного моделирования данного механизма для конструирования его релевантного цифрового образа.

Материалы и методы

Исследование проводилось в системной парадигме, основывающейся на теории систем и системном подходе. Системная парадигма использована в адаптированном для общественных (человеконаполненных¹) систем виде.

¹ Человеконаполненная система (ЧНС) – это общественная метасистема, видовыми отличиями которой являются: а) способность ЧНС к долгосрочному сохранению целостности за счет *объективно* протекающей в историческом процессе *институциональной эволюции*; б) наличие у ЧНС коллективного, институционального самоосознания, позволяющего идентифицировать себя как актора исторического процесса и принимать решения (которые являются объективным фактором исторической эволюции); в) мета-функциональность, основывающаяся на выполнении ЧНС двух функций. Во-первых, это классическая, *потоково-преобразовательная* функция (преобразование входов в выходы). Во-вторых, это *информационно-интегрирующая* функция (соединительная),

Для исследования причин исторических эволюционных изменений экономико-хозяйственных механизмов использованы общенаучные методы анализа и синтеза, инструментарий системно-организационного анализа.

В ходе анализа фактического материала и для изложения результатов применен метод структурно-логического моделирования и визуализации концептуальных основ экономико-хозяйственных систем.

Для укрупненного рассмотрения и логического осмысления динамики организационных механизмов, а также для представления результатов системно-организационного анализа использован системно-процессный подход и соответствующее моделирование.

Использован метод знаниево-логического конструирования и футурологического моделирования при рассмотрении перспектив развития экономико-хозяйственных механизмов.

В работе предложено моделирование киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа в четырех основных проекциях эволюции интегрального естественного бытия системо-общества – ее «четырёхмерное» моделирование. Моделирование является четырехмерным, поскольку в основе его лежат четыре основные проекции (мерности), в которых протекает эволюционирование интегрального объективного естественного бытия. Схема основных проекций интегрального, объективного естественного бытия системо-общества приведены на рис. 1.



Рис. 1. Модель, представляющая основные проекции интегрального, объективного естественного бытия системо-общества

которая служит информационной основой для организационного взаимодействия, самоидентификации, самооценки прочих систем общества (понятие определено с использованием трудов С. В. Емельянова, Э. Л. Наппельбаум [29, 30], Н. В. Манохиной [29]).

Для раскрытия сути модели основных проекций интегрального, объективного естественного бытия системо-общества в системной парадигме определено понятие «мегасфера».

Под *мегасферой* естественного бытия системо-общества понимается область естественного бытия, образованная интегральной совокупностью первичных законов и принципов организации. Мегасфера в естественном бытии проявлена в форме информационного базиса программного воспроизводства *организационных сущностей* естественного бытия (например, это системы и процессы в составе их организационных предикатов¹), поэтому мегасфера – сфера энергоинформационного программного кода организационных сущностей в интегральном, объективном естественном бытии системо-общества.

Обзор проблемы

Зарождение концепции устойчивого ESG-развития связано с необходимостью вовлечь современный *бизнес* в решение задач обеспечения долгосрочного процветания общества. В своем изначальном виде концепция рассматривалась как платформа совершенствования организационного механизма корпоративного управления, которая призвана была продвинуть корпоративное управление по пути повышения ответственности [6, 7]:

- а) за окружающую экосреду;
- б) социальное взаимодействие с обществом;
- в) качество корпоративного управления [33].

Отметим, что изначальным определяющим мессианским фокусом устойчивого ESG-развития корпорации декларировалась *экспансия*. Экспансия – это «экспансивное развитие» (рис. 2), предполагающее завоевание корпорацией новых рынков и/или выведение на рынки новых товаров. Сегодня концепция *управления* ESG-развитием корпорации неуклонно трансформируется в концепцию «устойчивого ESGC-развития киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа».

По результатам настоящего исследования с учетом идеи цепочки ценности М. Портера разработана процессная модель организационного механизма киберсоциального промышленного кластера (рис. 3). Модель позволила в структурированном виде представить, как в результате взаимодействия основных институциональных групп кластера, а также институтов их поддержки (в рамках основного организационного механизма и обеспечивающего механизмов кластера) формируются основные выходы кластера – потребительские ценности, а также вклад в развитие и совершенствование сред институциональной ответственности кластера.

Основные институциональные группы киберсоциальной промышленной экосистемы кластерного типа (далее – «киберсоциальный промышленный кластер» или «кластер») включают участников и организаторов промышленных корпоративных форм экосистемы кластерного типа. Это участники-предприниматели (УП), участники-инвесторы (УИ), участники – институциональные доноры (УИД).

¹ Организационные предикаты – это «внутренние» организационные сущности по группе данных организационных сущностей. Например, система состоит из элементов. Элементы – внутренние предикаты системы.

Основные институциональные группы киберсоциального промышленного кластера – это группы, обеспечивающие *основную деятельность кластера* в рамках его организационного механизма.

Основная деятельность кластера (ОДК) – это интегральная предпринимательская деятельность якорных корпораций (ЯК) во взаимосвязи с малым и средним бизнесом и индивидуальным предпринимательством, реализуемая в рамках кластера. ОДК обеспечивает выпуск высоковостребованного пакета потребительских ценностей на выходе кластера, а также развитие и совершенствование сред институциональной ответственности кластера (см. рис. 3).

Обеспечивающий механизм кластера опирается на деятельность участников – организаторов механизмов институциональной поддержки основной деятельности.

В период доминирования позднеиндустриального способа производства (эпоха ПИН-общества) потребительские ценности создавались предприятиями и организациями, которые сотрудничали преимущественно в рамках отраслевых, потоково-передельных структур экономико-хозяйственного механизма. Однако сегодня наблюдается переход к новому интегральному киберинформационному способу производства потребительских ценностей. Он в значительной мере основывается на устойчивом ESGC-развитии киберсоциальных промышленных кластеров.

В таких кластерах генерируется и оттачивается интегральный киберинформационный способ производства. Это в свою очередь влечет за собой изменение всей структурной организации экономико-хозяйственного механизма на всех уровнях и является условием успешного вхождения в эпоху Интегрального КИФ-общества.

Основы концепции устойчивого ESGC-развития киберсоциального промышленного кластера

При переходе от ПИФ-общества к Интегральному КИФ-обществу меняется ведущий организационный субъект эволюционных процессов экономико-хозяйственной сферы страны. Если ранее это была корпорация, то теперь ведущим организационным субъектом становится киберсоциальный промышленный кластер. Организация кластера основывается на ряде мессианских фокусов (аспектов) (рис. 4) и комплексе организационных принципов:

- 1) ответственное отношение к окружающей среде (environment – E);
- 2) высокая социальная ответственность (social – S);
- 3) качественное корпоративное управление предприятий, учитывающее кластерную локализацию предприятия (corporate governance – G) [21];
- 4) эффективная организация и управление промышленной экосистемой кластерного типа (cluster-type ecosystems – C).

«Организационный механизм устойчивого ESGC-развития *киберсоциального промышленного кластера*» включает ряд организационных предикатов высшего уровня (табл. 1) и входяще-выходящие потоки.

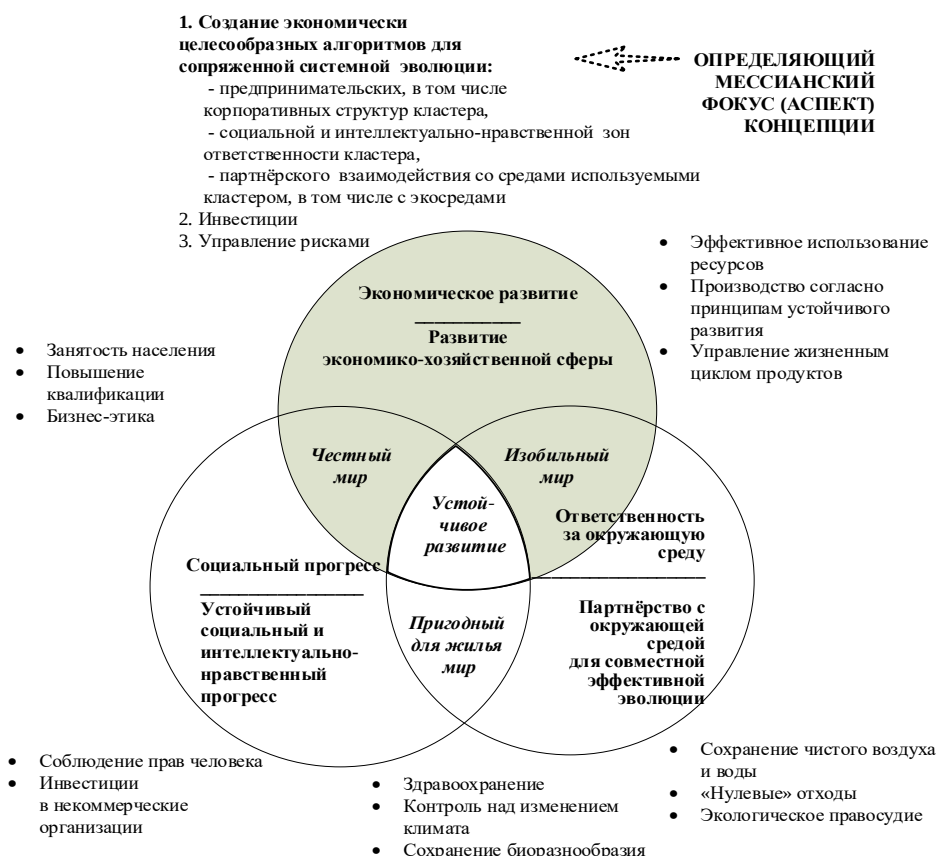


Рис. 4. Основные мессианские фокусы (аспекты) устойчивого ESGC-развития киберсоциального промышленного кластера

Таблица 1

Организационные предикаты высшего уровня

Наименование организационных предикатов высшего уровня
1. Механизм (подмеханизм) ответственного отношения к окружающей среде (environment – E) институтов социальных групп и основных участников кластера
2. Механизм (подмеханизм) социальной ответственности (social – S) институтов социальных групп и основных участников кластера
3. Механизм (подмеханизм) сопряженного с экосистемой кластерного типа корпоративного управления основных участников кластера (corporate governance – G) [21]
4. Механизм (подмеханизм) институционального регулирования и организационной координации работы кластера (cluster-type ecosystems – C)

Входяще-выходящие потоки

На выходе организационный механизм устойчивого ESGC-развития имеет поток общественно полезной потребительской ценности (ОППЦ) с положительным индексом полезности¹. Это важнейший параметр системы контроля организационной эффективности.

¹ Положительный индекс полезности означает, что данная ОППЦ способствует поступательной эволюции систем общества и государства.

На входе организационный механизм устойчивого ESGC-развития должен предъявлять спрос на факторы (ресурсы и/или условия) с положительным индексом полезности ОППЦ.

В качестве примера в сокращенном виде в табл. 2 приведены компоненты «механизма институционального регулирования и организационной координации работы кластера» (частично раскрыт п. 4, см. табл. 1) [23]¹.

Таблица 2

Компоненты механизма институционального регулирования
и организационной координации работы кластера (п. 1.4)

Предикаты механизма организации промышленной экосистемы кластерного типа и ее управления		Пояснения и характеристики по предикатам с учетом вида ОС ²
О.предикаты-1 ¹	Практическое проявление	
Подсистема 4 – {система организации управления промышленной экосистемы и ее кластерного типа} {СОУ ПЭКТ}	СОУ ПЭКТ представляет собой институционально-организационное образование внутри кластера, ответственное: 1) за системную организацию промышленной экосистемы кластерного типа; 2) стратегическое и оперативное управление киберсоциальной промышленной экосистемой кластерного типа и др.	Ответственность 1 – за формирование адекватной модели промышленной экосистемы кластерного типа, включая определение: общего вида системы, ее внутренней организации (основных предикат и ресурсных компонентов, потоков входов-выходов и др.)
Процесс 4 – [эволюционная динамика организации промышленной экосистемы кластерного типа и ее управления]	Представляет собой эволюционную динамику системы 4 в области: 1) организации промышленной экосистемы кластерного типа; 2) стратегического и оперативного управления киберсоциальной промышленной экосистемой кластерного типа	Проявляется в объективной эволюции общего вида подсистемы 4: – ее внутренней организации (основных предикат и ресурсных компонентов); – потоков входов-выходов; – институциональных интересов и т.д.

О б о з н а ч е н и я:

- система/подсистема – {...};
- процесс/подпроцесс – [...];
- механизм – «...»;
- «о.предикаты» – организационные предикаты;
- «О.предикаты-1» – организационные предикаты 1 уровня. О.предикаты-1 являются предикатами, «входящими в состав» организационных предикатов высшего уровня. В парадигме теории систем (ТС) «о.предикаты» – это организационные сущности (ОС), существующие как «внутренние» ОС по отношению к некоторой «своей» ОС. Например, ОС «структура» является о.предикатом ОС «система». О.предикаты как категория отражают логику ТС, где каждая организационная сущность более низкого уровня является объективно необходимым *следствием* существования организационной сущности более высокого уровня;
- ОС – организационные сущности;
- РОС – ресурсные организационные сущности, классификация приведена в [32].

¹ Сам «механизм...» входит на правах предиката в состав организационного механизма устойчивого ESGC-развития кластера.

Качество и объемы входяще-выходящих потоков киберсоциального промышленного кластера определяют его место и роль в организационной иерархии промышленного экономико-хозяйственного механизма страны¹. Последний формируется следующими уровнями (по признаку масштаба агрегации) и внутриуровневыми группами:

а) высший уровень агрегации, формирующий промышленный экономико-хозяйственный механизм страны: регион, промышленность;

б) средний уровень агрегации, формирующий промышленный экономико-хозяйственный механизм страны, – это киберсоциальный промышленный кластер;

г) базисный уровень агрегации, формирующий промышленный экономико-хозяйственный механизм страны, – это предпринимательская структура (предприятие).

Каждый из перечисленных уровней агрегации имеет свои подуровни.

Для решения задачи эффективной организации и регулирования эволюционной динамики, оптимизации программ развития и купирования рисков в формировании интегрального киберинформационного способа производства *высший, средний и базовый уровень промышленного экономико-хозяйственного механизма страны* должны быть представлены в виде сопряженных киберинформационных форм – «цифровых образов» (табл. 3). Это позволит любое управленческое и организационное решение тестировать на цифровой платформе, далее совершенствовать и сопровождать в режиме реального времени.

Таблица 3

Базовые киберинформационные формы высшего, среднего и базового уровня агрегации промышленного экономико-хозяйственного механизма страны (в качестве обсуждения)

Группы ¹	Базисная киберинформационная форма: «цифровой образ»
1	2
<i>Высший уровень агрегации</i>	
Регион (региональная промышленность)	Цифровой регион (цифровой образ региона) в составе трех блоков параметров (<i>для обсуждения</i>): – организационных механизмов отраслей и кластеров; – социальных страт, обеспечивающих работу ведущих кластеров и отраслей (как модулей промышленности); – социальных страт, существующих вне ведущих кластеров и отраслей
Промышленность (отрасль экономико-хозяйственного механизма)	Цифровая отрасль (цифровой образ промышленности) в составе параметров, позволяющих анализировать и держать на контроле эволюцию (<i>для обсуждения</i>): а) структур; б) функций; в) входяще-исходящих потоков; г) актуальность по стадиям жизненного цикла

¹ Сегодня (в рамках традиции экономикса) принято экономико-хозяйственную систему называть сокращенно «экономика». Но экономические отношения – это лишь часть всего экономико-хозяйственного механизма, создающего на промышленной основе материальную основу современного общества. Кроме того, наименование категорий в системной парадигме должно отражать их фундаментальную, организационную сущность, поэтому нами в настоящей работе используется термин «экономико-хозяйственный механизм».

1	2
<i>Средний уровень агрегации</i>	
Киберсоциальный промышленный кластер	Цифровой кластер (цифровой образ кластера) в составе параметров (для обсуждения): а) факторы производства потребительской ценности; б) киберзнания и киберсоциальные механизмы; в) основные организационные механизмы, осуществляющие основную деятельность, и соответствующие институциональные группы (рис. 5); г) обеспечивающие организационные механизмы и институты поддержки основной деятельности (рис. 5)
<i>Базовый уровень агрегации</i>	
Предприятие ²	Цифровое предприятие (цифровой образ), цифровое производство и управление, цифровая грамотность и профобучение

Примечания: 1 – группы по уровням агрегации; 2 – предпринимательская структура.

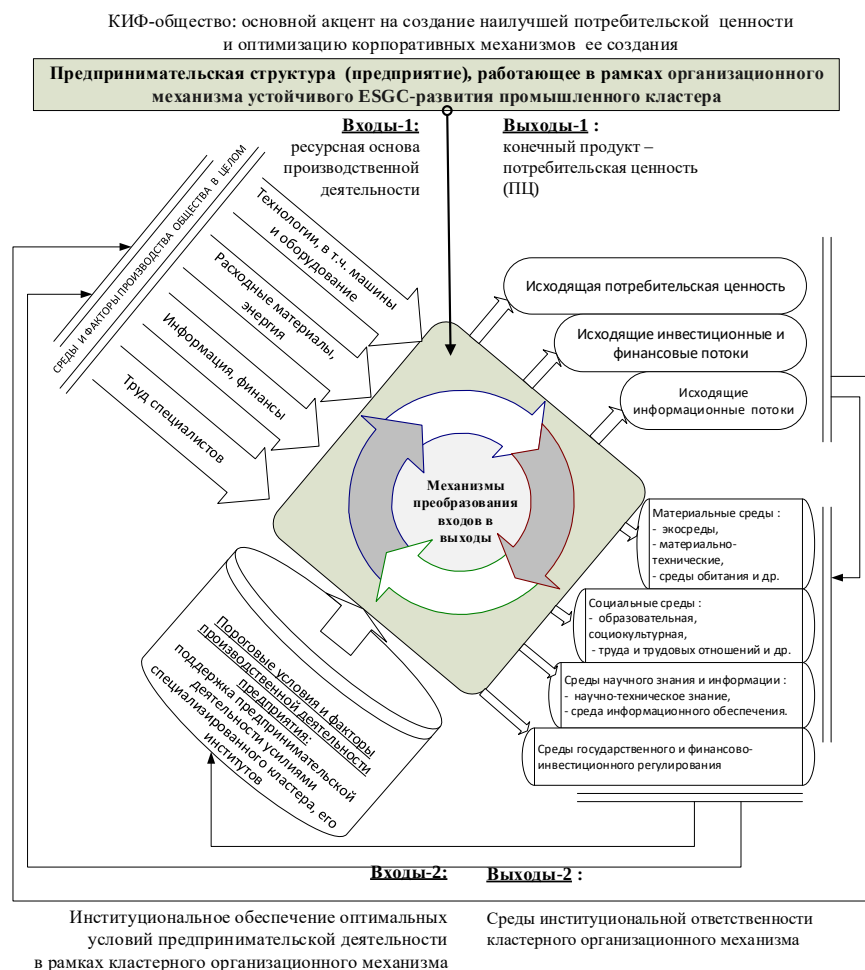


Рис. 5. Модель организационного механизма киберсоциального промышленного кластера

От адекватности цифровых образов (см. табл. 3) и качества их моделирования напрямую зависит:

1) эффективность базовой киберинформационной формы – «цифрового образа кластера»;

2) эффективность работы всех сопряженных с *киберсоциальным промышленным кластером* уровней и внутриуровневых групп. Это определяет необходимость системного многомерного моделирования механизма устойчивого ESGC-развития.

***Многомерное системное моделирование механизма устойчивого
ESGC-развития киберсоциальной промышленной
экосистемы кластерного типа***

Организационный механизм устойчивого ESGC-развития *киберсоциального промышленного кластера* – это ядро интегрального киберинформационного способа производства (далее – «интегральный КИФ-способ производства»), аутентичного вступающему в свои права Интегральному КИФ-обществу. Интегральный КИФ-способ производства решает задачу сопряженной, взаимно поддерживающей эволюции всех предпринимательских структур в среду Интегрального КИФ-общества.

В связи с этим так велики роль и место устойчивого ESGC-развития *киберсоциального промышленного кластера*. На рис. 5 представлена модель организационного механизма *киберсоциального промышленного кластера*.

Модель организационного механизма *киберсоциального промышленного кластера* – это «*концептуальный (абстрактный) образ киберсоциального промышленного кластера*». Для воплощения в реальность экономико-управленческих отношений *концептуальный образ* должен быть преобразован в цифровой образ.

Цифровой образ киберсоциального промышленного кластера – это базисная киберинформационная форма представления ключевых экономико-управленческих отношений, которые регулирует данный кластер. Он включает основные комбинации структур и архитектур экономико-управленческих отношений кластера, системообразующие организационные сущности.

Моделирование цифрового образа *киберсоциального промышленного кластера* должно быть проведено в четырех основных проекциях эволюции интегрального естественного бытия (по модели проекций на рис. 1). Необходимость четырехмерного представления цифрового образа связана с тем, что только так возможно в комплексе увязать весь спектр эволюционных изменений промышленного экономико-хозяйственного механизма страны, который имеет место при переходе к интегральному КИФ-способу производства. Моделирование в четырех основных проекциях эволюции интегрального естественного бытия (далее – «четыре проекции бытия») является основополагающим условием создания релевантного цифрового образа *киберсоциального промышленного кластера*.

Для подготовки цифрового образа (на правах укрупненного примера) определим содержание проекций мегасферы «макробытие & микробытие» для двух организационных предикатов высшего уровня (ОПВУ):

– ОПВУ-1 – это «механизм ответственного отношения к окружающей среде институтов социальных групп и основных участников кластера»;

– ОПВУ-2 – это «механизм социальной ответственности институтов социальных групп и основных участников кластера». Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Пример знаниево-логического конструирования организационных предикатов высшего уровня в проекциях мегасферы «макробытие & микробытие»

ОПВУ ¹		Проекция мегасферы «макробытие & микробытие»	
		Кол.1: Макробытие КИФ-общества	Кол.2: Микробытие КИФ-общества
1	А	Глобальные экосреды: воздушные, водные, среды обитания живых организмов и др.	Локальные экосреды. Средообразующие виды. Средообразующие условия
	Б	1. Условно локальные среды обитания: человека, животных, растений. 2. Глобальные механизмы обращения веществ в природе и обществе: пищевые цепочки и др. 3. Механизмы сопряжения условно локальных сред обитания	1. «Человек» ¹ в его основных проявлениях: этно-культурном, интеллектуально-нравственном, физиологическом, социально-коммуникативном и др. 2. Виды растений и животных и их роль в глобальных механизмах обращения веществ в природе и обществе
	В	Материально-технические среды ресурсобеспечения человеческой деятельности: области залегания полезных ископаемых, среда воспроизводства возобновляемых ресурсов и др.	1. Поколения техники и технологий. 2. Технические и технологические платформы. 3. Ресурсы и материалы для экономической деятельности. 4. Виды энергии и использующих ее силовых машин. 5. Виды информации, инструментарий ее получения и обработки
2	А	Общество в составе его глобальных сред: культурно-этической, экономической, научно-технологической и др.	1. Ценности и приоритеты: человека, семьи, этно-культурных групп, наций, народов. 2. Виды и формы экономической деятельности. 3. Уровни научно-технологического развития, инструменты и методы их достижения

Примечание. 1 – как субъект общества и исторического развития.

Как видно из табл. 4, представление сред *киберсоциального промышленного кластера* в виде сопряженных ОПВУ в проекциях мегасферы «макробытие & микробытие» позволяет уже на начальном этапе системно-организационного анализа обеспечить *организационно-информационный баланс* рассматриваемых организационных сущностей кластера – как по горизонтали (по строкам), так и по вертикали (по столбцам).

На данном кратком примере (для обсуждения) нами показана необходимость и полезность его информационно-аналитической модели многомерного моделирования механизма устойчивого ESGC-развития киберсоциального промышленного кластера для формирования цифрового образа киберсоциального промышленного кластера.

Выводы

В настоящей работе представлены следующие результаты исследований:

1. В развитии фундаментальных основ экономики и управления в системной парадигме представлена модель четырехмерного рассмотрения естественного бытия системо-общества в проекциях «макробытие & микробытие» и «абстрактное бытие & реальное бытие» (см. рис. 1), а также дано краткое определение понятия «*мегасфера*».

2. Разработаны процессная модель организационных механизмов *киберсоциального промышленного кластера*, являющегося ядерным механизмом интегрального КИФ-способа производства, и условие перехода к Интегральному КИФ-обществу (см. рис. 3).

4. В контексте эволюционного перехода от концепции устойчивого развития ESG-развития (см. рис. 2) к концепции устойчивого ESGC-развития (предложены концептуальные теоретико-методологические положения 4, см. табл. 1–3) предложен организационный механизм устойчивого ESGC-развития *киберсоциального промышленного кластера*.

5. В рамках модели основных мессианских фокусов (аспектов) устойчивого ESGC-развития киберсоциального промышленного кластера (см. рис. 4) предложена замена фокуса (аспекта) экспансии на фокус (аспект) создания экономически целесообразных алгоритмов для сопряженной системной эволюции:

- а) предпринимательских, в том числе корпоративных структур кластера;
- б) социальной и интеллектуально-нравственной зон ответственности кластера;
- в) партнерского взаимодействия со средами, используемыми кластером, в том числе с экосредами.

6. Проанализированы организационные механизмы устойчивого ESGC-развития киберсоциального промышленного кластера и определены основные (механизмообразующие) организационные предикаты высшего уровня (см. табл. 1), а также входяще-выходящие потоки механизма. Это позволило определить и проанализировать компоненты организационных предикатов высшего уровня (см. табл. 2).

7. Определены базисные киберинформационные формы высшего, среднего и базового уровня агрегации промышленного экономико-хозяйственного механизма страны, задающие требования к моделированию организационного механизма устойчивого ESGC-развития киберсоциального промышленного кластера.

8. Определены понятия «концептуальный (абстрактный) образ киберсоциального промышленного кластера» и «цифровой образ киберсоциального промышленного кластера».

9. Разработана модель общего вида (высший уровень обобщения) организационного механизма киберсоциального промышленного кластера (см. рис. 5).

10. Разработан пример знаниево-логического конструирования организационных предикатов высшего уровня в проекциях мегасферы «макробытие & микробытие» (см. табл. 4).

Список литературы

1. Новое интегральное общество: общетеоретические аспекты и мировая практика / О. Т. Богомолов, Г. Г. Водолазов, С. Ю. Глазьев [и др.] ; под ред. Г. Н. Цаголова. М. : URSS, 2016. 250 с.
2. Глазьев С. Ю. Глобальная трансформация через призму смены технологических и мирохозяйственных укладов // *AlterEconomics*. 2022. Т. 19, № 1. С. 93–115.
3. Батукова Л. Р. Теоретическое обоснование метода стратегирования экономико-управленческого развития общества // *Экосистемы в цифровой экономике: драйверы устойчивого развития* : монография / под ред. д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. С. 355–394. doi: 10.18720/IEP/2021.4/15
4. Батукова Л. Р. Футурологическое моделирование основных конкретно-исторических циклов фазового развития общества как инструмента стратегирования // *Индустрия 5.0, цифровая экономика и интеллектуальные экосистемы (ЭКОПРОМ-2021)* : сб. тр. Всерос. (Нац.) науч.-практ. конф. (18–20 ноября 2021 г.) / под ред. д-ра экон. наук, проф. Д. Г. Родионова, д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. С. 28–32. doi: 10.18720/IEP/2021.3/3
5. Батукова Л. Р. Национальное стратегическое планирование: генезис, понятие, трехконтурная организация // *Стратегическое управление устойчивым развитием экономики в новой реальности* : монография / под ред. д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 11–58. doi: 10.18720/IEP/2022.2/1
6. Петрова К. С. Корпоративное управление в контексте ESG // *Инновации и инвестиции*. 2022. № 7. С. 48–52.
7. Национальный доклад по корпоративному управлению. Вып. XIII. URL: https://mfcmoscow.com/assets/files/analytics/NSKU_2021.pdf (дата обращения: 24.06.2022).
8. Клейнер Г. Б. Промышленные экосистемы: взгляд в будущее // *Экономическое возрождение России*. 2018. № 2 (56). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennyye-ekosistemy-vzglyad-v-budushee> (дата обращения: 31.01.2023).
9. Бабкин А. В., Буркальцева Д. Д., Костень Д. Г., Воробьев Ю. Н. Формирование цифровой экономики в России: сущность, особенности, техническая нормализация, проблемы развития // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2017. Т. 10, № 3. С. 9–25.
10. Кобзев В. В., Бабкин А. В., Скоробогатов А. С. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях новой реальности // *π-Economy*. 2022. Т. 15, № 5. С. 7–27. doi: 10.18721/JE.15501
11. Гамидуллаева Л. А. Промышленный кластер региона как локализованная экосистема: роль факторов самоорганизации и коллаборации // *π-Economy*. 2023. Т. 16, № 1. С. 62–82. doi: 10.18721/JE.16105
12. Белякова Г. Я., Фокина Д. А. Цифровая экономика и новые подходы к управлению производственной кооперацией в машиностроении // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2019. № 5-1. С. 24–29.
13. Степнов И. М., Ковальчук Ю. А. Инвестиционная оценка современных бизнес-моделей // *Учет. Анализ. Аудит*. 2021. Т. 8, № 2. С. 12–23. doi: 10.26794/2408-9303-2021-8-2-12-23
14. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond // *Procedia CIRP*. 2016. № 52. P. 173–178.
15. Pfohl H., Yahsi B., Kurnaz T. The impact of Industry 4.0 on the supply chain // *HICL-Conference Proceedings*. 2015. P. 31–58.

16. Gabrielsson J., Politis D., Billström A. University spin-offs and triple helix dynamics in regional innovation ecosystems: A comparison of technology intensive start-ups in Sweden // *Global Business and Economics Review*. 2019. № 1 (3-4). P. 362–381.
17. Демиденко Д. С., Малевская-Малевиц Е. Д., Кудряшов В. С., Бабкин И. А. Оценка эффективности деятельности предприятий на основе ESG концепции // *π-Economy*. 2022. Т. 15, № 4. С. 82–95. doi: 10.18721/JE.15406
18. Бабкин А. В., Гузикова Л. А., Малевская-Малевиц Е. Д. Устойчивое развитие инновационно-активных промышленных предприятий и кластеров на основе экологизации. СПб : Изд-во СПбПУ, 2021. 120 с.
19. Вострикова Е. О., Мешкова А. П. ESG-критерии в инвестировании: зарубежный и отечественный опыт // *Финансовый журнал*. 2020. Т. 12, № 4. С. 117–129.
20. Гамидуллаева Л. А., Толстых Т. О., Шмелева Н. В. Методика комплексной оценки потенциала промышленной экосистемы в контексте устойчивого развития региона // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2020. № 2. С. 29–48.
21. Коростышевская Е. М., Плотников В. А., Пролубников А. В., Рукинов М. В. Социальная компонента государственной региональной политики и ее роль в обеспечении устойчивого развития и экономической безопасности // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2018. № 6. С. 120–126.
22. Ратнер С. В. Циркулярная экономика: теоретические основы и практические приложения в области региональной экономики и управления // *Инновации*. 2018. № 9. С. 29–37.
23. Канаева О. А. Социальные императивы устойчивого развития // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*. 2018. Т. 34, вып. 1. С. 26–58. doi: 10.21638/11701/spbu05.2018.102
24. Клейнер Г. Б. Системная методология Александра Богданова в контексте современного экономического мировоззрения // *Вопросы экономики*. № 3. С. 24–39.
25. Бабкин А. В., Глухов В. В., Шкарупета Е. В. Методика оценки цифровой зрелости отраслевых промышленных экосистем // *Организатор производства*. 2022. № 30. С. 7–20.
26. Штомпка П. Социология социальных изменений : пер. с англ. М., 1996. 416 с.
27. Батукова Л. Р. Национальное стратегическое планирование: организационная основа программирования развития экономико-управленческой сферы // *Экономика и Индустрия 5.0 в условиях новой реальности (ИНПРОМ-2022) : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с зарубежным участием (28–30 апреля 2022 г.) / под ред. д-ра экон. наук, проф. Д. Г. Родионова, д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина*. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 26–30. doi: 10.18720/LEP/2022.1/3
28. Клейнер Г. Б. Социально-экономические экосистемы в свете системной парадигмы // *Системный анализ в экономике – 2018 : сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. – биеннале / под общ. ред. Г. Б. Клейнера, С. Е. Щепетовой*. 2018. С. 5–14.
29. Емельянов С. В., Наппельбаум Э. Л. Системы, целенаправленность, рефлексия // *Системные исследования. Методологические проблемы : ежегодник*. 1981. С. 7–38.
30. Емельянов С. В., Уткин В. И., Таран В. А. [и др.]. Теории систем с переменной структурой / под ред. С. В. Емельянова. М. : Наука, 1970. 592 с.
31. Манохина Н. В. Метасистема как объект институционального анализа // *Вестник Международного института экономики и права*. 2014. № 1. С. 7–16.
32. Батукова Л. Р., Багдасарян Н. А., Багдасарян Л. А. Концепция обеспечения организационной эффективности формирования специалиста в области управления на базе университета 4.0 в интересах устойчивого развития России // *π-Economy*. 2023. № 16. С. 22–44. doi: 10.18721/JE.16302
33. Scott S. Governance: Putting the G in ESG. URL: <https://starlingtrust.com/couch/uploads/file/putting-the-g-inesg-starling.pdf> (дата обращения: 04.07.2022).

34. Макаров И. Н., Назаренко В. С., Осипова И. В., Лесных Е. В. ESG-подход в системе стратегического управления экономическими системами национального и регионального уровня // Креативная экономика. 2022. Т. 16, № 7. С. 2569–2586. doi: 10.18334/ce.16.7.114893

References

1. Bogomolov O.T., Vodolazov G.G., Glaz'ev S.Yu. et al. *Novoe integral'noe obshchestvo: obshcheteoreticheskie aspekty i mirovaya praktika* = *The new integral society: general theoretical aspects and world practice*. Moscow: URSS, 2016:250. (In Russ.)
2. Glaz'ev S.Yu. Global transformation through the prism of changing technological and world economic patterns. *AlterEconomics*. 2022;19(1):93–115. (In Russ.)
3. Batukova L.R. Theoretical substantiation of the method of strategizing the economic and managerial development of the company. *Ekosistemy v tsifrovoy ekonomike: drayvery ustoychivogo razvitiya: monografiya* = *Ecosystems in the digital economy: Drivers of sustainable development : monograph*. Saint Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2021:355–394. (In Russ.). doi: 10.18720/IEP/2021.4/15
4. Batukova L.R. Futurological modeling of the main concrete historical cycles of the phase development of society as a strategizing tool. *Industriya 5.0, tsifrovaya ekonomika i intellektual'nye ekosistemy (EKOPROM-2021): sb. tr. Vseros. (Nats.) nauch.-prakt. konf. (18–20 noyabrya 2021 g.)* = *Industry 5.0, digital economy and intellectual ecosystems (ECOPROM-2021) : collection of proceedings of All Russia (National) scientific and practical conference (November 18–20, 2021)*. Saint Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2021:28–32. (In Russ.). doi: 10.18720/IEP/2021.3/3
5. Batukova L.R. National strategic planning: genesis, concept, three-circuit organization. *Strategicheskoe upravlenie ustoychivym razvitiem ekonomiki v novoy real'nosti: monografiya* = *Strategic management of sustainable economic development in a new reality : monograph*. Saint Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2022:11–58. (In Russ.). doi: 10.18720/IEP/2022.2/1
6. Petrova K.S. Corporate governance in the context of ESG. *Innovatsii i investitsii* = *Innovation and investment*. 2022;(7):48–52. (In Russ.)
7. *Natsional'nyy doklad po korporativnomu upravleniyu. Vyp. XIII* = *National Report on Corporate Governance. Issue XIII*. (In Russ.). Available at: https://mfcmoscow.com/assets/files/analytics/NSKU_2021.pdf (accessed 24.06.2022).
8. Kleyner G.B. Industrial ecosystems: a look into the future. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii* = *The economic revival of Russia*. 2018;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennye-ekosistemy-vzglyad-v-budushee> (accessed 31.01.2023).
9. Babkin A.V., Burkal'tseva D.D., Kosten' D.G., Vorob'ev Yu.N. Formation of the digital economy in Russia: essence, features, technical normalization, development problems. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki* = *Scientific and technical bulletin of SPbGPU. Economic sciences*. 2017;10(3):9–25. (In Russ.)
10. Kobzev V.V., Babkin A.V., Skorobogatov A.S. Digital transformation of industrial enterprises in the conditions of a new reality. *π-Economy*. 2022;15(5):7–27. (In Russ.). doi: 10.18721/JE.15501
11. Gamidullaeva L.A. Industrial cluster of the region as a localized ecosystem: the role of factors of self-organization and collaboration. *π-Economy*. 2023;16(1):62–82. (In Russ.). doi: 10.18721/JE.16105
12. Belyakova G.Ya., Fokina D.A. Digital economy and new approaches to the management of industrial cooperation in mechanical engineering. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* = *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2019; (5-1):24–29. (In Russ.)

13. Stepnov I.M., Koval'chuk Yu.A. Investment assessment of modern business models. *Uchet. Analiz. Audit = Accounting. Analysis. Audit*. 2021;8(2):12–23. (In Russ.). doi: 10.26794/2408-9303-2021-8-2-12-23
14. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A sategorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*. 2016;(52):173–178.
15. Pfohl H., Yahsi B., Kurnaz T. The impact of Industry 4.0 on the supply chain. *HICL-Conference Proceedings*. 2015:31–58.
16. Gabrielsson J., Politis D., Billström A. University spin-offs and triple helix dynamics in regional innovation ecosystems: A comparison of technology intensive start-ups in Sweden. *Global Business and Economics Review*. 2019;(1):362–381.
17. Demidenko D.S., Malevskaya-Malevich E.D., Kudryashov V.S., Babkin I.A. Evaluation of the efficiency of enterprises based on the ESG concept. *π-Economy*. 2022;15(4):82–95. (In Russ.). doi: 10.18721/JE.15406
18. Babkin A.V., Guzikova L.A., Malevskaya-Malevich E.D. *Ustoychivoe razvitie innovatsionno-aktivnykh promyshlennykh predpriyatiy i klasterov na osnove ekologizatsii = Sustainable development of innovative and active industrial enterprises and clusters based on greening*. Saint Petersburg: Izd-vo SPbPU, 2021:120. (In Russ.)
19. Vostrikova E.O., Meshkova A.P. ESG-criteria in investing: foreign and domestic experience. *Finansovyy zhurnal = Financial Journal*. 2020;12(4):117–129. (In Russ.)
20. Gamidullaeva L.A., Tolstykh T.O., Shmeleva N.V. Methodology for a comprehensive assessment of the potential of an industrial ecosystem in the context of sustainable development of the region. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;(2):29–48. (In Russ.)
21. Korostyshevskaya E.M., Plotnikov V.A., Prolubnikov A.V., Rukinov M.V. Social component of state regional policy and its role in ensuring sustainable development and economic security. *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta = Proceedings of the Saint Petersburg State University of Economics*. 2018;(6):120–126. (In Russ.)
22. Ratner S.V. Circular economy: theoretical foundations and practical applications in the field of regional economics and management. *Innovatsii = Innovation*. 2018;(9):29–37. (In Russ.)
23. Kanaeva O.A. Social imperatives of sustainable development. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Ekonomika = Bulletin of Saint Petersburg University. Economy*. 2018;34(1):26–58. (In Russ.). doi: 10.21638/11701/spbu05.2018.102
24. Kleyner G.B. Alexander Bogdanov's system methodology in the context of modern economic outlook. *Voprosy ekonomiki = Economic issues*. (3):24–39. (In Russ.)
25. Babkin A.V., Glukhov V.V., Shkarupeta E.V. Methodology for assessing the digital maturity of industrial ecosystems. *Organizator proizvodstva = Organizer of production*. 2022;(30):7–20. (In Russ.)
26. Shtompka P. *Sotsiologiya sotsial'nykh izmeneniy: per. s angl. = Sociology of social change : trans. from English*. Moscow, 1996:416. (In Russ.)
27. Batukova L.R. National strategic planning: organizational basis for programming the development of the economic and managerial sphere. *Ekonomika i Industriya 5.0 v usloviyakh novoy real'nosti (INPROM-2022): sb. tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. s zarubezhnym uchastiem (28–30 aprelya 2022 g.) = Economics and Industry 5.0 in the conditions of a New reality (INPROM-2022) : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. with foreign participation (April 28-30, 2022)*. Saint Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2022:26–30. (In Russ.). doi: 10.18720/IEP/2022.1/3
28. Kleyner G.B. Socio-economic ecosystems in the light of a systemic paradigm. *Sistemnyy analiz v ekonomike – 2018: sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – biennale = System analysis in economics – 2018 : proceedings of the V International Scientific and practical conference – biennale*. 2018:5–14. (In Russ.)

29. Emel'yanov S.V., Nappel'baum E.L. Systems, purposefulness, reflection. *Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy: ezhegodnik = System research. Methodological problems : yearbook*. 1981:7–38. (In Russ.)
30. Emel'yanov S.V., Utkin V.I., Taran V.A. et al. *Teorii sistem s peremennoy strukturoy = Theories of systems with variable structure*. Moscow: Nauka, 1970:592. (In Russ.)
31. Manokhina N.V. Metasystem as an object of institutional analysis. *Vestnik Mezhdunarodnogo instituta ekonomiki i prava = Bulletin of the International Institute of Economics and Law*. 2014;(1):7–16. (In Russ.)
32. Batukova L.R., Bagdasaryan N.A., Bagdasaryan L.A. The concept of ensuring the organizational effectiveness of the formation of a specialist in the field of management on the basis of University 4.0 in the interests of sustainable development of Russia. *π-Economy*. 2023;(16):22–44. (In Russ.). doi: 10.18721/JE.16302
33. Scott S. *Governance: Putting the G in ESG*. Available at: <https://starling-trust.com/couch/uploads/file/putting-the-g-inesg-starling.pdf> (accessed 04.07.2022).
34. Makarov I.N., Nazarenko V.S., Osipova I.V., Lesnykh E.V. ESG-approach in the system of strategic management of national and regional economic systems. *Kreativnaya ekonomika = Creative Economics*. 2022;16(7):2569–2586. (In Russ.). doi: 10.18334/ce.16.7.114893

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Бабкин

доктор экономических наук,
кандидат технических наук, профессор,
профессор Высшей инженерно-
экономической школы Института
промышленного менеджмента,
экономики и торговли, ведущий научный
сотрудник НИИ «Политех-инвест»,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая 29)
E-mail: Babkin@spbstu.ru

Aleksandr V. Babkin

Doctor of economical sciences,
candidate of technical sciences, professor,
professor of the higher engineering
and economic school of the institute
of industrial management, economics
and trade, leading researcher
at the politech-invest research institute,
Peter the Great Saint Petersburg
Polytechnic University
(29 Polytechnic street, Saint Petersburg,
Russia)

Луиза Рихардовна Батукова

доктор экономических наук, доцент,
доцент кафедры экономики
и управления бизнес-процессами,
Сибирский федеральный университет
(Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26А)
E-mail: malilu@yandex.ru

Luiza R. Batukova

Doctor of economical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of economics
and business process management,
Siberian Federal University
(26A Kirensky street, Krasnoyarsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 01.08.2023

Поступила после рецензирования/Revised 18.08.2023

Принята к публикации/Accepted 20.08.2023

КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ CO₂: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ФОРМ РЕАЛИЗАЦИИ

И. П. Дорожкина¹, А. А. Череповицына²

^{1, 2} Институт экономических проблем имени Г. П. Лузина
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

² Центр экологической промышленной политики, Мытищи, Россия

¹ irinadorozhkina.99@gmail.com, ² iljinovaaa@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сегодня промышленные и энергетические компании, в том числе отечественные, все больше ориентируют свою деятельность на сбалансированное экологическое развитие и декарбонизацию. Одним из перспективных направлений декарбонизации применительно к промышленным и энергетическим системам считается комплекс технологий улавливания, хранения и использования углекислого газа (CC(U)S – carbon capture, storage and utilization). Однако развитие данных инициатив на текущем этапе в России отсутствует по ряду причин. В исследовании учитываются особенности этих инициатив при организации разных этапов технологической цепи, уделяется внимание подходам к их построению с целью изучения моделей реализации комплекса CC(U)S в промышленности. *Материалы и методы.* Исследование выполнено на основе открытых источников информации (научные статьи по теме, аналитические отчеты различных организаций) с применением методов кабинетного исследования, контент-анализа, систематизации, декомпозиции, типологии и экспертных методов. *Результаты.* Результатами исследования выступают анализ межотраслевого характера технологических цепей CC(U)S на примере реальных проектов и терминологического аппарата применительно к организационным формам реализации таких инициатив, а также разработанная система факторов, определяющих возможности их внедрения. *Выводы.* Разработанная система может служить ориентиром при принятии решений о реализации инициатив CC(U)S на разных управленческих уровнях, в том числе в условиях России.

Ключевые слова: улавливание, хранение и использование CO₂, CC(U)S, технологические цепи, межотраслевой характер, организационные формы, система факторов

Для цитирования: Дорожкина И. П., Череповицына А. А. Комплекс технологий улавливания, хранения и использования CO₂: теория и практика организационных форм реализации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 38–52. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-3

COMPLEX OF TECHNOLOGIES FOR CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE: THEORY AND PRACTICE OF ORGANIZATIONAL FORMS OF IMPLEMENTATION

I.P. Dorozhkina¹, A.A. Cherepovitsyna²

^{1, 2} Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research center
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

² Center for Environmental Industrial Policy, Mytishchi, Russia

¹ irinadorozhkina.99@gmail.com, ² iljinovaaa@mail.ru

Abstract. *Background.* Today, industrial and energy companies, including domestic ones, are increasingly focusing their activities on balanced environmental development and decarbonization. A complex of technologies for carbon dioxide capture, utilization and storage (CC(U)S) is considered one of the promising areas of decarbonization in relation to industrial and energy systems. However, there is no development of these initiatives at the current stage in Russia for a number of reasons. The authors of this study take into account the peculiarities of these initiatives when organizing different stages of the technological chain, and pay attention to organizational approaches to their construction in order to study models for the implementation of the CC(U)S. *Materials and methods.* The research was carried out on the basis of open sources of information (scientific articles on the topic, analytical reports of various organizations) using the methods of desk research, content analysis, systematization, decomposition, typology and expert methods. *Results.* The results of the study are the analysis of the intersectoral nature of CC(U)S technological chains on the example of real projects and terminology in relation to organizational forms of implementation of such initiatives, as well as the developed system of factors determining the possibilities of their implementation. *Conclusions.* The developed system can serve as a guide when making decisions on the implementation of CC(U)S initiatives at various management levels, including in Russia.

Keywords: carbon capture, utilization and storage, CC(U)S, technological chains, intersectoral nature, organizational forms, system of factors

For citation: Dorozhkina I.P., Cherepovitsyna A.A. Complex of technologies for carbon capture, utilization and storage: theory and practice of organizational forms of implementation. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):38–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-3

Введение

В настоящее время мировая и отечественная промышленность сталкивается с новыми вызовами. Мировое сообщество обеспокоено проблемой глобального потепления, что обуславливает определенное давление на промышленные и энергетические сектора, ответственные за существенную часть выбросов парниковых газов (ПГ) – порядка 12 и 30 % по миру соответственно¹. В сложившихся условиях российские промышленные компании, деятельность которых связана с существенными выбросами ПГ, формируют новые стратегии и внедряют новые практики, еще больше ориентированные на устойчивое развитие, движение к углеродной нейтральности и декарбонизацию своей деятельности.

В качестве примера можно рассмотреть низкоуглеродные практики некоторых российских компаний. Так, ПАО «ГМК "Норильский никель"» реализует программу по снижению выбросов серы и сохранению объемов выбросов ПГ с ростом объемов производства, планирует осуществлять переход на низкоуглеродные источники энергии². ПАО «Газпром нефть» для достижения климатических целей занимается развитием программ повышения уровня полезного использования попутного нефтяного газа (ПНГ), проектов по

¹ World Resources Institute. URL: <https://www.wri.org/> (дата обращения: 02.03.2023).

² Стратегия в области экологии и изменения климата. Отчет ПАО «ГМК "Норильский никель"». URL: https://www.nornickel.ru/upload/iblock/1cd/Norilsk_Nickel_Environmental_Strategy_2021_ru.pdf (дата обращения: 04.02.2023).

повышению энергоэффективности, инициатив и проектов CC(U)S, направленных среди прочего на увеличение нефтеотдачи пластов¹. ПАО «Северсталь» также поддерживает идею внедрения инициатив CC(U)S наравне с водородными проектами и проектами по повышению энергоэффективности².

Основываясь на разных заявлениях, можно сделать вывод, что российские компании действительно пересматривают фокус своего стратегического развития в сторону декарбонизации деятельности, в том числе проявляют интерес к технологиям CC(U)S. По мнению ряда ученых, проекты улавливания, хранения и использования CO₂ играют основополагающую роль в декарбонизации энергетики и промышленности, смягчая и делая более постепенными процессы энергетического перехода [1]; особое значение данные инициативы принимают в отраслях, испытывающих большую потребность в энергии, например в нефте- и газопереработке [2, 3]. Комплекс CC(U)S также видится промышленным компаниям как один из наиболее реалистичных и коммерчески доступных по сравнению с другими направлениями декарбонизации, а также перспективным для внедрения в нефтегазовой отрасли, так как CO₂ может быть использован для повышения нефтеотдачи пластов (технологии CO₂-EOR).

Несмотря на то, что комплекс технологий CC(U)S рассматривают как перспективный, количество действующих проектов в мире невелико. На сегодняшний день, согласно базе данных Глобального института CCS, в мире насчитывается 33 действующих коммерческих проекта CC(U)S. Лидерами являются США, Канада, Китай, страны Европы и Ближнего Востока. Реализация полноценных коммерческих проектов CC(U)S в России на данном этапе отсутствует.

К основным причинам, сдерживающим распространение инициатив CC(U)S, эксперты относят высокие затраты на их реализацию [4], а также незрелость технологий (прежде всего, улавливания), нормативно-правовой базы и ряд других; кроме того, наблюдаются сложности в выстраивании всей технологической цепочки – от улавливания до захоронения/использования. В аналитических отчетах³ и научной литературе предпринимаются попытки определения подходов к оценке стоимости реализации различных звеньев технологической цепи CC(U)S в отраслях промышленности [5]. Ряд статей посвящен исследованию факторов, влияющих на развитие CC(U)S, среди которых выделяют политико-правовые, технологические, экологические, экономические, организационные и др. [6–8]. Есть отдельные исследования, посвященные организационным моделям выстраивания таких процессов⁴. Ряд ученых

¹ ПАО «Газпром нефть». Новостной портал. URL: https://www.gazprom-neft.ru/press-center/news/gazprom_neft_obedinit_usiliya_s_severstalyu_i_evrazom_po_razvitiyu_tekhnologiy_dlya_sokrashcheniya_u/ (дата обращения: 04.02.2023).

² Будущее декарбонизации металлургической отрасли: вызовы и решения. Отчет ПАО «Северсталь». URL: <https://vmeste.severstal.com/sustainability/budushchee-dekarbonizatsii-metallurgii-vyzovy-i-resheniya/> (дата обращения: 04.02.2023).

³ CCUS: монетизация выбросов CO₂. Отчет Vygon Consulting. 2021. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgys72b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения: 17.04.2023) ; ZEP: The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage. 2011. URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf> (дата обращения: 18.04.2023).

⁴ Understanding industrial CCS hubs and clusters. 2019. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

занимается изучением особенностей конкретных организационных форм реализации CC(U)S, в том числе транспортных сетей и хабов CC(U)S [9,10], промышленных кластеров CC(U)S [11], но не рассматриваются их принципиальные отличия, факторы, определяющие возможности их организации. Анализ моделей и организационных форм реализации комплекса технологий CC(U)S остается недостаточно изученным.

Понимание специфики организации таких цепочек в разных отраслях промышленности, принципиальных отличий организационных форм CC(U)S, а также основ их функционирования необходимо для выработки подходов к внедрению CC(U)S в промышленности с учетом ряда организационных факторов, определяющих возможности их реализации, что формирует цель настоящего исследования.

Материалы и методы

Исследование выполнено на основе открытых источников информации с целью систематизации знаний о формах и возможностях организации цепей CC(U)S в промышленности. Исследование базируется на методах кабинетного исследования и контент-анализа. Для интерпретации полученных данных, в том числе по терминологическому аппарату, использовались методы сравнительного, критического, причинно-следственного анализа. Методы систематизации, декомпозиции, типологии и экспертные методы были ключевыми при формировании системы факторов, определяющих возможности для реализации различных организационных форм технологической цепи CC(U)S.

Теоретико-методологическую базу исследования составляют научные статьи зарубежных и российских ученых по теме, информационную – аналитические отчеты таких организаций, как Глобальный институт CCS (Global CCS Institute), Институт энергетического перехода Керни (The Kearney Energy Transition Institute), Vygon Consulting, официальные сайты приведенных в работе проектов CC(U)S. Основным источником статистических данных в области улавливания, хранения и использования CO₂ является база данных Глобального института CCS.

Сущность комплекса технологий CC(U)S и мировой опыт реализации проектов

В общем виде комплекс технологий CC(U)S включает три последовательных технологических этапа: улавливание газа на источнике выбросов, его подготовка и транспортировка одним из известных способов, полезное использование и/или закачка с целью долгосрочного хранения под землей.

Существуют примеры проектов CC(U)S, функционирующих в рамках одной отрасли, однако они, скорее, являются единичными и зачастую базируются на объектах по производству водорода и биоэтанола, в нефтегазовой отрасли¹. Для реализации всей технологической цепи CC(U)S чаще задействованы разные сектора промышленности, что объясняется необходимостью реализации нескольких технологических этапов. В табл. 1 представлены примеры таких проектов.

¹ CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 04.01.2023).

Таблица 1

Проекты CC(U)S, реализующиеся в рамках одной и нескольких отраслей промышленности (составлено авторами по данным Global CCS Institute ¹)

Проект	Страна	Количество задействованных отраслей	Категория проекта (по объемам ² улавливания)	Стадия проекта ³	Отрасли, в которых реализуется проект
Проект на месторождении Русанда	Сербия / Россия	1	Мелкий	В эксплуатации	Нефтегазовая
Baytown Low Carbon Hydrogen	США	1	Крупнейший глобальный	Активная разработка	Производство водорода
ACTL	Канада	2	Крупный	В эксплуатации	Нефтегазовая, химическое производство
CCU Lighthouse Carboneras	Испания	2	Средний	н /д	Цементное и химическое производство
Zero Carbon Humber	Великобритания	4	Крупнейший глобальный	н /д	Цементное и химическое производство, производство чугуна и стали, энергетическая

Так, на российском проекте ПАО «Газпром нефть» на месторождении Русанда в Сербии задействована одна отрасль – нефтегазовая. Другим примером проекта, реализующегося в рамках одной отрасли, является американский проект Baytown Low Carbon Hydrogen на базе крупнейшего завода по производству водорода⁴.

Среди примеров проектов, реализующихся в двух и более отраслях, можно выделить канадский проект ACTL, где углекислый газ улавливается на химических заводах и заводе по производству удобрений, далее транспортируется трубопроводом, принадлежащем сервисной компании Wolf

¹ Global Status of CCS 2021 / Global CCS Institute. 2021. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/> (дата обращения: 14.04.2023) ; Carbon Capture Utilization and Storage / The Kearney Energy Transition Institute. 2021 URL: <https://www.kenarney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021+FactBook.pdf> (дата обращения: 14.04.2023) ; CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 04.01.2023).

² Для отнесения проекта к категории по объему мощностей и стадии проекта используются классификации, разработанные Глобальным институтом CCS и Институтом энергетического перехода Керни.

³ Для отнесения проекта к категории по объему мощностей и стадии проекта используются классификации, разработанные Глобальным институтом CCS и Институтом энергетического перехода Керни.

⁴ CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 04.01.2023).

Midstream, на нефтяные месторождения, где закачивается в пласты с целью повышения нефтеотдачи¹. Проект CCU Lighthouse Carboneras в Испании будет базироваться на цементном заводе и будет направлен на улавливание CO₂ для дальнейшего преобразования, очистки и повторного использования для повышения урожайности в сельском хозяйстве². Крупнейший глобальный проект Zero Carbon Humber в Великобритании объединяет химические, металлургические, цементные и другие промышленные заводы, выбрасывающие CO₂³.

Так, этапы технологической цепи CC(U)S в рамках одного проекта в общем виде могут быть организованы следующим образом: CO₂ обычно улавливается на промышленных заводах, энергетических объектах, транспортируется по трубопроводам, операторами которых являются нефтегазовые компании, закачивается в нефтегазовые пласты с целью увеличения нефтеотдачи или направляется на повторное полезное использование в сельском хозяйстве и других отраслях. Это позволяет сформировать идею о том, что технологические цепи и проекты CC(U)S носят межотраслевой характер, что определяет особые подходы к организации и управлению такими инициативами. При этом организационные формы их реализации приобретают различные виды и в научной литературе и практико-ориентированных аналитических материалах могут называться по-разному.

Анализ терминологического аппарата применительно к организационным формам реализации инициатив и проектов CC(U)S

Организационные формы CC(U)S могут различаться в зависимости от количества источников улавливания, особенностей использования газа / его захоронения, характеристик транспортной системы, объектов, являющихся участниками технологического процесса, и прочего, что определяет набор критериев, по которым можно провести их сравнительный анализ (табл. 2).

Самой простой формой организации CC(U)S является цепочка создания стоимости (value chain) или единичный объект (CC(U)S facility), обычно интегрирующая все этапы технологической цепи CC(U)S от улавливания до захоронения/использования CO₂. Зачастую проекты с таким типом организации технологической цепи относят к категории мелких, в которых CO₂ улавливается из одного источника и захороняется/используется на одном объекте.

Существуют и более сложные организационные формы CC(U)S, которые в зарубежной литературе могут носить название кластеров (clusters), сетей (networks) и хабов (hubs).

¹ Global CCS Institute welcomes the 20th and 21st large-scale CCS facilities into operation. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/press-room/media-releases/global-ccs-institute-welcomes-the-20th-and-21st-large-scale-ccs-facilities-into-operation/> (дата обращения: 25.01.2023).

² Lighthouse Carboneras. URL: <https://www.carbonclean.com/news/lafargeholcim-and-carbon-clean-to-develop-large-scale-ccus-plant> (дата обращения: 25.01.2023).

³ Zero Carbon Humber. URL: <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/> (дата обращения: 29.01.2023).

Таблица 2

Сравнительный анализ различных организационных форм реализации инициатив и проектов CC(U)S (составлено авторами с использованием данных¹)

Организационная форма	Количество источников улавливания	Количество мест хранения	Наличие транспортной инфраструктуры	Основные компании-участники
Цепочка создания стоимости (Value chain)	1	1	Отсутствует / есть трубопровод	Промышленные, энергетические, транспортные
Промышленный кластер (Industrial cluster)	Много	–	–	Промышленные, энергетические
Кластер хранения (Storage cluster)	–	Много	–	Энергетические
Кластерная сеть (Cluster / CC(U)S network)	Много	1	Есть трубопровод/разветвленная транспортная сеть	Промышленные, энергетические, транспортные
Международные сети и партнерство (International networks and collaboration)	1 и более	1 и более	Есть трубопровод/разветвленная транспортная сеть	Международные промышленные, энергетические, транспортные
Хаб CC(U)S (CC(U)S hub)	Много	Много	Разветвленные транспортные сети, объединенные центральным пунктом сбора	Промышленные, энергетические, транспортные

В контексте CC(U)S можно выделить два вида кластеров:

1. Промышленные кластеры (industrial clusters) – форма организации этапа улавливания технологической цепи CC(U)S. Для CC(U)S идея кластеров улавливания порождена тем, что по всему миру существует множество объектов выбросов ПГ, которые зачастую расположены на небольших расстояниях друг от друга.

2. Кластеры хранения (storage clusters) – форма организации этапа захоронения технологической цепи CC(U)S. В кластерах хранения CO₂ обычно распределяется между группой различных, но достаточно близких по расположению геологических мест хранения и/или нефтегазовых месторождений.

Развитие идеи кластеров поспособствовало созданию другой организационной модели – кластерной сети (cluster/CC(U)S network), которая тесно

¹ CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.03.2023) ; Understanding industrial CCS hubs and clusters. 2019. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

связана с понятием «транспортная сеть» или «трубопроводная сеть» (pipeline network) [10, 12]. В общем случае это укрупненная организационная модель, которая объединяет элементы цепочки создания стоимости с несколькими совместно расположенными (кластеризованными) источниками улавливания, поставляющими CO₂ в единую систему транспортировки и хранения¹. По сравнению с единичными объектами CC(U)S, кластерные сети крупнее и включают в себя больше заинтересованных сторон с более активным участием местных и региональных органов власти [11]. Разновидностью кластерной сети являются международные сети и партнерство (international networks and collaboration). Это кластерные сети, реализующиеся на территории нескольких государств или объединяющие объекты, операторами которых являются международные компании.

По мере увеличения промышленных кластеров (кластеров улавливания) инфраструктура транспортировки и хранения может также расширяться, и в географических районах, где наблюдается высокая концентрация как промышленных и энергетических объектов, так и близлежащих мощностей для хранения CO₂, создаются предпосылки для развития хабов CC(U)S (CC(U)S hubs). Эта наиболее сложная и одновременно «молодая» организационная модель, обычно объединяющая промышленные кластеры и кластеры хранения с разветвленными транспортными сетями, объединенными центральным пунктом сбора. Хабы могут создаваться как на этапе улавливания, так и на этапе хранения, или одновременно на обоих этапах.

Исследование данных организационных форм от самой простой к более сложной позволяет выделить их принципиальные отличия, на основе которых могут быть выявлены ключевые факторы, определяющие возможности для реализации каждой модели.

Организационные факторы, определяющие возможности реализации различных форм организации технологической цепи CC(U)S

Накопленный мировой опыт позволяет проводить исследования, направленные на изучение вопросов, связанных с реализацией проектов CC(U)S в определенных странах и регионах. Ряд исследований посвящен формированию общих факторов, влияющих на развитие таких инициатив, – механизмов, которые стимулируют их внедрение [3, 13]. Ученые сходятся во мнениях, что наибольшее влияние на проекты CC(U)S оказывают политико-правовые факторы [8, 14], среди которых выделяют общепринятые нормативно-правовые базы, меры государственной поддержки и регулирования, образовательные и финансовые инструменты, включающие схемы торговли выбросами. К другим группам факторов ученые относят экономические (затраты на реализацию и коммерческие эффекты), экологические (уровень выбросов ПГ), социальные (восприятие/одобрение проектов и других экологических инициатив общественностью) и организационные (уровень экономического развития в стране, опыт использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), значимость традиционных видов топлива и др.) [8].

¹ Understanding industrial CCS hubs and clusters. 2019. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

Несмотря на наличие общих факторов в конкретных странах и регионах, для реализации той или иной организационной формы существует ряд частных факторов, идентификация и анализ которых позволяет определить целесообразность реализации той или иной формы в каждом конкретном случае. Авторы выявили и систематизировали следующие частные факторы:

- наличие источника выбросов;
- концентрация нескольких объектов/источников выбросов на одной географической территории;
- возможность создания/использования существующей транспортной системы;
- возможность создания/использования существующих центральных пунктов сбора и распределения;
- наличие мощностей хранения;
- концентрация мощностей хранения на одной географической территории;
- возможность международного сотрудничества.

Проведенное исследование выявленных принципиальных отличий организационных моделей (см. табл. 2) позволило идентифицировать факторы, являющиеся решающими, определяющими возможности реализации той или иной организационной формы. В результате анализа выявленных факторов сформировалась система (табл. 3), учитывающая характерные, отличительные особенности выявленных организационных моделей CC(U)S.

Для цепочки создания стоимости решающим фактором является наличие источника выбросов и мощностей хранения. Для кластера улавливания определяющим фактором становится наличие источника улавливания, для кластера хранения – мощностей хранения с возможностью их концентрации на одной географической территории. Другие факторы, по мнению авторов, не являются решающими при принятии решения о реализации данных форм.

Важным и отличительным от предыдущих форм фактором при реализации кластерной сети является наличие возможности создания или использования существующей транспортной системы и концентрации нескольких источников улавливания в определенной географической области, что следует из определения кластерной сети. Для данной модели характерно наличие одного места хранения, поэтому необходимость в концентрации мощностей хранения в этом случае отсутствует.

Отличительной особенностью и фактором, определяющим возможности реализации международных сетей и партнерства, является, в первую очередь, возможность международного сотрудничества. Допускается, что данный фактор может быть характерным и для любой другой организационной модели, но решающим является только в случае реализации международной сети.

Возможность организации хаба – самой сложной организационной формы CC(U)S – зависит от большого количества факторов, решающим среди которых является возможность организации разветвленной транспортной сети и центральных пунктов сбора, что отличает хаб от других организационных моделей. В случае хаба снижается значимость международного сотрудничества, однако существуют примеры такого взаимодействия.

Таблица 3

Система факторов, определяющих возможности реализации различных форм организации технологической цепи CC(U)S (составлено авторами)

	Наличие источника выбросов	Концентрация нескольких объектов/источников выбросов на одной географической территории	Возможность создания/использования существующей транспортной системы	Возможность создания/использования существующих центральных пунктов сбора и распределения	Наличие мощностей хранения	Концентрация мощностей хранения на одной географической территории	Возможность международного сотрудничества
Цепочка создания стоимости							
Кластер улавливания							
Кластер хранения							
Кластерная сеть							
Международная сеть							
Хаб							

 – фактор, определяющий возможности реализации организационной формы.

Обсуждение

Важно отметить, что анализ форм организации технологических цепей CC(U)S и исследование в целом проводилось на основе открытых источников информации, что обуславливает ряд сложностей при сборе данных, получении результатов и их интерпретации.

Разработанная система факторов может служить ориентиром для принятия решений о том, какую модель организации технологической цепи целесообразно выбирать для внедрения в определенном регионе, при различных условиях. Так, с помощью нее можно теоретизировать потенциальные регионы России, где в перспективе могут реализовываться различные формы организации технологической цепи CC(U)S с учетом выявленных факторов. Авторы предполагают, что простые формы могут внедряться на базе промышленных заводов и объектов энергетики, которые, в свою очередь, достаточно распространены, в случае наличия по близости мощностей хранения и транспортных систем, согласно разработанной системе факторов.

Видится, что основными объектами, где может улавливаться углекислый газ, в России могут стать нефтеперерабатывающие заводы; металлургические комбинаты; заводы по производству аммиака, минеральных удобрений и др. Наибольшая концентрация российских промышленных заводов данных отраслей характерна для территорий Уральского, Центрального, Приволжского федерального округа. Перечисленные регионы могут рассматриваться, согласно разработанной системе факторов, как потенциальные кластеры улавливания углекислого газа. Стоит принимать к сведению, что предложенная система учитывает лишь те особенности, которые отличают одну организационную форму от другой, однако не исключено, что на их реализацию могут влиять и другие факторы. В случае кластера улавливания таким фактором будет наличие мощностей для захоронения CO₂, расположенных на разумном для реализации проекта расстоянии, так как улавливание углекислого газа нецелесообразно без его дальнейшей утилизации.

Решающим фактором при реализации кластера хранения, согласно разработанной системе, является концентрация мощностей хранения на одной географической территории. Согласно различным исследованиям [15, 16], в России такими территориями потенциально могут стать области нефтегазоносных провинций: Западно-Сибирской, Волго-Уральской, Тимано-Печорской, Северо-Кавказской, так как они отличаются сосредоточением месторождений в одном регионе.

Создание в регионах кластерных сетей и хабов вызывает больше всего вопросов и сомнений в силу ограниченности информации. Ситуация также осложняется рядом исключений, которые можно выявить на практике. Так, в базе данных Глобального института CCS все реальные функционирующие проекты CC(U)S классифицируются по двум категориям: единичный объект и сеть CC(U)S, однако известно о том, что в мире создаются и развиваются хабы, международные сети и т.д. Учитывая вышесказанное, авторы предприняли попытку систематизации мирового опыта для определения более четких границ между выявленными организационными формами CC(U)S и установления решающих факторов, определяющих возможности их внедрения.

Одновременно с тем, согласно Vygon Consulting¹, расположение Волго-Уральской нефтегазоносной провинции вблизи крупных производственных

¹ CCUS: монетизация выбросов CO₂. Отчет Vygon Consulting. 2021. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgys72b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

мощностей считается наиболее благоприятным и перспективным для создания в регионе хаба CC(U)S. Однако хаб CC(U)S на сегодняшний день является наиболее сложной и молодой в сравнении с другими формами организации технологической цепи CC(U)S организационной формой, что становится ограничивающим фактором при проведении исследований по данному вопросу.

Выводы

Авторы настоящей статьи предприняли попытку систематизации накопленного опыта с целью формирования новых идей и взглядов на реализацию комплекса технологий CC(U)S в промышленности. В результате исследования были сделаны выводы, что технологические цепи CC(U)S в основном являются межотраслевыми: этапы технологического процесса могут быть реализованы в нескольких отраслях промышленности и энергетики, что подтверждается примерами реальных проектов.

Проведенный сравнительный анализ различных организационных моделей построения цепей CC(U)S позволил выделить простые формы, такие как цепочка создания стоимости или единичный объект, и формы, связанные с возможностью концентрации производственных мощностей, укрупнения их в кластеры, кластерные сети и хабы CC(U)S. Авторы допускают, что выявленные характеристики организационных моделей CC(U)S в общем случае будут присущи конкретным проектам, но могут быть исключения.

На основе анализа терминологического аппарата и выявленных принципиальных отличий организационных моделей CC(U)S авторы предприняли попытку выявления факторов, определяющих возможности их внедрения. Авторы рассмотрели ряд микро- и макроэкономических факторов, а также идентифицировали решающие для каждой организационной модели. В результате была разработана система факторов, определяющих возможности реализации различных организационных форм построения технологической цепи CC(U)S. Результаты исследования, по мнению авторов, могут быть использованы при планировании реализации проектов CC(U)S и выборе оптимальной организационной формы в определенном регионе, в том числе российскими промышленными и энергетическими компаниями, а также на государственном уровне.

Список литературы

1. Bui M., Adjiman C. S., Bardow A. [et al.]. Carbon capture and storage (CCS): the way forward // *Energy & Environmental Science*. 2018. Vol. 11, № 5. P. 1062–1176. doi: 10.1039/C7EE02342A
2. Khorasani M., Sarker S., Kabir G., Ali S. M. Evaluating strategies to decarbonize oil and gas supply chain: Implications for energy policies in emerging economies // *Energy*. 2022. Vol. 258. P. 124805. doi: 10.1016/j.energy.2022.124805
3. Dalla Longa F., Detz R., van der Zwaan B. Integrated assessment projections for the impact of innovation on CCS deployment in Europe // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2020. Vol. 103. P. 103133. doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103133
4. Budinis S., Krevor S., Dowell N. M. [et al.]. An assessment of CCS costs, barriers and potential // *Energy Strategy Reviews*. 2018. Vol. 22. P. 61–81. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003

5. Skobelev D., Cherepovitsyna A., Guseva T. Carbon capture and storage: net zero contribution and cost estimation approaches // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. P. 125–140. doi: 10.31897/PMI.2023.10
6. Dixon T., McCoy S. T., Havercroft I. Legal and Regulatory Developments on CCS // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015. Vol. 40. P. 431–448. doi: 10.1016/j.ijggc.2015.05.024
7. Torvanger A., Meadowcroft J. The political economy of technology support: Making decisions about carbon capture and storage and low carbon energy technologies // *Global Environmental Change*. 2011. Vol. 21, № 2. P. 303–312. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.01.017
8. Romasheva N., Ilinova A. CCS Projects: How Regulatory Framework Influences Their Deployment // *Resources*. 2019. Vol. 8, № 4. P. 181. doi: 10.3390/resources8040181
9. Harkin T., Filby I., Sick H. [et al.]. Development of a CO₂ Specification for a CCS Hub Network // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 114. P. 6708–6720. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1801
10. Wetenhall B., Race J. M., Aghajani H. [et al.]. Considerations in the Development of Flexible CCS Networks // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 114. P. 6800–6812. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1810
11. Gough C., Mander S. CCS industrial clusters: Building a social license to operate // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2022. Vol. 119. P. 103713. doi: 10.1016/j.ijggc.2022.103713
12. Guo J.-X. Integrated optimization model for CCS hubs and pipeline network design // *Computers & Chemical Engineering*. 2020. Vol. 132. P. 106632. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106632
13. Koelbl B. S., van den Broek M., van Ruijven B. J. [et al.]. Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2014. Vol. 27. P. 81–102. doi: 10.1016/j.ijggc.2014.04.024
14. Groenenberg H., de Coninck H. Effective EU and Member State policies for stimulating CCS // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2008. Vol. 2, № 4. P. 653–664. doi: 10.1016/j.ijggc.2008.04.003
15. Череповицын А. Е., Васильев Ю. Н. Оценка перспектив внедрения технологий секвестрации CO₂ // РИСК: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2018. № 2. С. 86–89.
16. Новиков Д. А., Дульцев Ф. Ф., Юрчик И. И. [и др.]. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации // *Нефтяное хозяйство*. 2022. № 3. С. 36–42. doi: 10.24887/0028-2448-2022-3-36-42

References

1. Bui M., Adjiman C. S., Bardow A. et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*. 2018;11(5):1062–1176. doi: 10.1039/C7EE02342A
2. Khorasani M., Sarker S., Kabir G., Ali S.M. Evaluating strategies to decarbonize oil and gas supply chain: Implications for energy policies in emerging economies. *Energy*. 2022;258:124805. doi: 10.1016/j.energy.2022.124805
3. Dalla Longa F., Detz R., van der Zwaan B. Integrated assessment projections for the impact of innovation on CCS deployment in Europe. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2020;103:103133. doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103133
4. Budinis S., Krevor S., Dowell N.M. et al. An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews*. 2018;22:61–81. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003

5. Skobelev D., Cherepovitsyna A., Guseva T. Carbon capture and storage: net zero contribution and cost estimation approaches. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:125–140. doi: 10.31897/PMI.2023.10
6. Dixon T., McCoy S.T., Havercroft I. Legal and Regulatory Developments on CCS. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015;40:431–448. doi: 10.1016/j.ijggc.2015.05.024
7. Torvanger A., Meadowcroft J. The political economy of technology support: Making decisions about carbon capture and storage and low carbon energy technologies. *Global Environmental Change*. 2011;21(2):303–312. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.01.017
8. Romasheva N., Ilinova A. CCS Projects: How Regulatory Framework Influences Their Deployment. *Resources*. 2019;8(4):181. doi: 10.3390/resources8040181
9. Harkin T., Filby I., Sick H. et al. Development of a CO₂ Specification for a CCS Hub Network. *Energy Procedia*. 2017;114:6708–6720. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1801
10. Wetenhall B., Race J.M., Aghajani H. et al. Considerations in the Development of Flexible CCS Networks. *Energy Procedia*. 2017;114:6800–6812. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1810
11. Gough C., Mander S. CCS industrial clusters: Building a social license to operate. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2022;119:103713. doi: 10.1016/j.ijggc.2022.103713
12. Guo J.-X. Integrated optimization model for CCS hubs and pipeline network design. *Computers & Chemical Engineering*. 2020;132:106632. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106632
13. Koelbl B.S., van den Broek M., van Ruijven B. J. et al. Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2014;27:81–102. doi: 10.1016/j.ijggc.2014.04.024
14. Groenenberg H., de Coninck H. Effective EU and Member State policies for stimulating CCS. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2008;2(4):653–664. doi: 10.1016/j.ijggc.2008.04.003
15. Cherepovitsyn A.E., Vasil'ev Yu.N. Assessment of prospects for the introduction of CO₂ sequestration technologies. *RISK: resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsia = RISK: resources, information, supply, competition*. 2018;(2):86–89. (In Russ.)
16. Novikov D.A., Dul'tsev F.F., Yurchik I.I. et al. Regional forecast of prospects for the disposal of carbon dioxide on the territory of the Russian Federation. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil economy*. 2022;(3):36–42. (In Russ.). doi: 10.24887/0028-2448-2022-3-36-42

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Петровна Дорожкина

стажер-исследователь
лаборатории управления
устойчивым развитием
промышленных и природных систем,
Институт экономических проблем
имени Г. П. Лузина Кольского
научного центра РАН
(Россия, Мурманская обл., г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24а)
E-mail: irinadorozhkina.99@gmail.com

Irina P. Dorozhkina

Trainee researcher
of the laboratory for management
of the sustainable development
of industrial and natural systems,
Luzin Institute for Economic Studies –
Subdivision of the Federal Research center
"Kola Science Center of the Russian
Academy of Sciences"
(24a Fersmana street, Apatity, Murmansk
region, Russia)

Алина Александровна Череповицына
кандидат экономических наук, доцент,
заведующий лабораторией управления
устойчивым развитием промышленных
и природных систем,
Институт экономических проблем
имени Г. П. Лузина Кольского
научного центра РАН
(Россия, Мурманская обл., г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24а);
главный научный сотрудник отдела
промышленной экологии,
Центр экологической
промышленной политики
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,
Олимпийский пр-кт, 42)
E-mail: iljinovaaa@mail.ru

Alina A. Cherepovitsyna
Candidate of economical sciences,
associate professor,
head of the laboratory for management
of the sustainable development
of industrial and natural systems,
Luzin Institute for Economic Studies –
Subdivision of the Federal Research center
"Kola Science Center of the Russian
Academy of Sciences"
(24a Fersmana street, Apatity, Murmansk
region, Russia);
chief researcher of the industrial ecology
department,
Center for Environmental Industry Policy
(42 Olympiyskiy avenue, Mytishchi,
Moscow Region, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 02.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 12.09.2023

Принята к публикации/Accepted 13.09.2023

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА КАК ЭКОСИСТЕМНЫЙ ИНТЕГРАТОР ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСНОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Т. О. Толстых¹, Н. В. Шмелева²,
И. Г. Супруненко³, И. С. Курошев⁴

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Москва, Россия

⁴ Центр экологической промышленной политики, Москва, Россия

¹tt400@mail.ru, ²nshmeleva@misis.ru, ³suprunenko123@mail.ru, ⁴i.kuroshev@eipc.center

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска новых подходов и приоритетов промышленной политики, разработки направлений повышения ресурсной и экологической эффективности экономики для обеспечения технологического суверенитета ключевых отраслей экономики. Цифровые платформы, выступая в роли интегратора, способствуют расширению направлений деятельности хозяйствующих субъектов и стиранию территориальных и отраслевых границ. *Материалы и методы.* Теоретико-методологической основой исследования служат труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные проблеме экосистемной интеграции компаний на мезо- и микроуровнях, повышения ресурсной и экономической эффективности промышленных предприятий. Исследование проводилось с использованием общенаучных методов, в числе которых методы наблюдения, описания, анализа, синтеза, индукции, сравнения, классификации. *Результаты.* Проведен анализ и оценка промышленных и экологических цифровых платформ по критериям экологического эффекта, инновационных технологий и решений, влияния на экономику. Определены стратегические направления развития экологических цифровых платформ. *Выводы.* Цифровизация интеграционных процессов промышленных предприятий развивается эволюционно и способствует повышению их ресурсной и экологической эффективности.

Ключевые слова: экосистемное взаимодействие, промышленные и экологические цифровые платформы, ресурсная эффективность

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 232-8-01548 «Интеграция предприятий в инновационные промышленные экосистемы для формирования окон возможностей развития и реализации политики импортонезависимости» (URL: <https://rscf.ru/project/23-28-01548>).

Для цитирования: Толстых Т. О., Шмелева Н. В., Супруненко И. Г., Курошев И. С. Цифровая платформа как экосистемный интегратор для промышленных предприятий в сфере повышения ресурсной и экологической эффективности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 53–69. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-4

A DIGITAL PLATFORM AS AN ECOSYSTEM INTEGRATOR FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES IN THE AREA OF RESOURCE AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY

T.O. Tolstykh¹, N.V. Shmeleva²,
I.G. Suprunenko³, I.S. Kuroshev⁴

^{1, 2, 3} National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

⁴ Environmental Industrial Policy Center, Moscow, Russia

¹ tt400@mail.ru, ² nshmeleva@isis.ru, ³ suprunenko123@mail.ru, ⁴ i.kuroshev@eipc.center

Abstract. *Background.* The relevance of the research is caused by the need to find new approaches and priorities of industrial policy, to develop directions to improve the resource and environmental efficiency of the economy to ensure the technological sovereignty of key sectors of the economy. Digital platforms, acting as an integrator, contribute to the expansion of areas of activity of economic entities and the blurring of territorial and sectoral boundaries. *Materials and methods.* The theoretical and methodological basis of the study is based on the works of domestic and foreign scientists devoted to the problem of ecosystem integration of enterprises at the meso and micro levels, increasing the resource and economic efficiency of industrial enterprises. The study was conducted using general scientific methods, including methods of observation, description, analysis, synthesis, induction, comparison and classification. *Results.* The authors analyzed and evaluated industrial and environmental digital platforms according to the criteria of environmental effect, innovative technologies and solutions, and impact on the economy. Strategic directions of development of ecological digital platforms were defined. *Conclusions.* The digitalization of the integration processes of industrial enterprises is evolving and contributes to their resource and environmental efficiency.

Keywords: ecosystem collaboration, industrial and environmental digital platforms, resource efficiency

Acknowledgments: the study has been supported by the grant from the Russian Science Foundation (RSF), project № 23-28-01548 "Integration of enterprises into innovative industrial ecosystems for the formation of windows of opportunity for development and implementation of the policy of import independence" (URL: <https://rscf.ru/project/23-28-01548>).

For citation: Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Suprunenko I.G., Kuroshev I.S. A digital platform as an ecosystem integrator for industrial enterprises in the area of resource and environmental efficiency. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):53–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-4

Введение

Достижение стратегических целей повышения ресурсной и экологической эффективности на предприятиях предполагает модернизацию технологических процессов и оборудования, поиск решений по использованию вторичных ресурсов в производственных процессах, реализацию инноваций, что влечет за собой для предприятия задачу поиска дополнительных инвестиций, финансовые риски, временные затраты. Результативность решения этих задач во многом зависит от финансовой прочности компании, управленческой зрелости топ-менеджмента, требует от руководства предприятий опыта, знаний и культуры в сфере ESG-повестки. И даже в случае стабильно развивающейся компании, возглавляемой командой опытных менеджеров и располагающей собственными сильными инженерами-технологами, реализовывать инновационные технологические проекты силами одной компании сложно. Цифровые

технологии как глобальный тренд общества выступают инструментом, открывающим широкое разнообразие возможностей. Современная цифровая среда не требует больших инвестиций в отдельные порталы для всех внешних обменов. Цифровое сообщество работает как сеть, в которой данные загружаются и передаются соответствующим сторонам, чтобы обеспечить более эффективные и экономичные совместные операции.

Основное качество цифрового сообщества – открытость. Открытость позволяет использовать всю доступную информацию о производственном процессе и цепочке создания стоимости для разработки новых возможностей на основе анализа. По мере того как целые цепочки создания стоимости становятся взаимосвязанными, а информация распространяется между организационными границами, предприятиям будет все труднее работать изолированно. Цифровизация – это то, что создается совместно. Инвестиции в цифровизацию в долгосрочной перспективе имеют экономический смысл, так как каждая инвестиция укрепляет бизнес-процесс, принося выгоды с точки зрения как производственного процесса, так и бизнеса в целом.

Одним из подходов в реализации стратегии повышения ресурсной и экологической эффективности для предприятия может стать его экосистемное взаимодействие с другими предприятиями посредством цифровой платформы, позволяющее обеспечить синергию ресурсов, знаний и опыта.

Разработка гипотезы и обзор литературы

Экосистемная модель интеграции различных участников рынка, ее преимущества, цели и перспективы достаточно широко обсуждаются в научной литературе. Г. Б. Коровин [1] предлагает классификацию сетевого взаимодействия в соответствии с институциональными, ресурсными, мировоззренческими или управленческими критериями. По мнению F. Anjos, первичным для интеграции является подход по ресурсному критерию, который заключается в объединении компаний с целью создания дополнительной ценности [2]. С этих позиций включение компании в сеть определяется степенью, в которой компания может получить или предоставить доступ к сетевым ресурсам, направив их по межорганизационным каналам [3]. Ценность, которую создает интеграция компаний, может быть как материальной [4], так и нематериальной [5]. Н. Большаков и В. Баденко исследуют интеграцию для обеспечения стратегии цифровой трансформации. Гипотеза исследователей заключается в том, что «применяя единый стандартизированный подход к цифровой трансформации, компании могут добиться большей надежности и устойчивости» [6]. Подход заключается в разработке общих межотраслевых принципов, которые рекомендуются в качестве практического руководства для предприятий при разработке стратегии цифровой трансформации. Следуя таким принципам, организации могут создавать синергию ресурсов, пользуясь коллективными отраслевыми знаниями и опытом. Y. Ma и R. Zhao считают, что для развития экономики необходимо улучшить интеграцию, используя «интеллектуальный метод прогнозирования изменения промышленной структуры и стратегии цифровизации для оптимизации и корректировки региональной политики». При анализе устойчивости сетевых промышленных структур в регионе стратегия комплексной корректировки связей, основанная на предложенном

авторами алгоритме прогнозирования связей, приводит к сокращению выбросов углерода и соответствует философии зеленого развития [7].

Альтернативную гипотезу вертикальной интеграции предприятий представили Nogueira, Pereira и др. Они проанализировали влияние синергии ресурсов в виде информации на уровень эффективности экосистемной интеграции. Гипотеза их исследования заключалась в том, что интегрированные компании являются лидерами в области инноваций продукции и что компании, развивающие экосистемное взаимодействие, являются более устойчивыми [8].

При этом под определением экосистемы часто понимаются достаточно разные, по сути, понятия:

- экосистемная интеграция как сетевое объединение компаний на принципах самоорганизации и партнерства, создающая особую дружелюбную инфраструктуру для реализации инновационных проектов или новых технологических решений [9–11];
- экосистемная компания, объединяющая группу предприятий и организаций для формирования особой философии продвижения товаров и услуг под своим брендом [12, 13];
- экосистема как интеграция в пулы цифровых платформ различных секторов промышленности [14, 15].

Объединяет эти понятия то, что акторами в таких моделях являются исключительно предприятия и организации, а интегратором экосистемы, объединяющим акторов, выступает либо компания, либо некоторый проект.

В статье мы рассмотрим экосистему, акторами которой могут являться не только предприятия и организации, но и технологические, и экологические решения, а интегратором выступает цифровая сервисная платформа, обеспечивающая поток информации между акторами и способная интегрировать лучшие практики повышения ресурсной эффективности, отвечающие на экологические, технологические и геополитические вызовы.

Такая платформа разрабатывается, в частности, в рамках развития «Энциклопедии технологий» – инициативного проекта, в реализацию которого вовлечены эксперты в области наилучших доступных технологий (НДТ), ученые, представляющие ведущие вузы Российской Федерации, практики, работающие в проектных и консультационных организациях [16].

Научной гипотезой исследования является предположение, что для эффективной реализации принципов устойчивого развития на промышленных предприятиях необходима экосистемная интеграция практик повышения ресурсной эффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду, обеспечивающая поиск лучших решений для всех участников через цифровую сервисную платформу на основе обмена опытом, знаний и культуры в сфере ESG-повестки (рис. 1).

Основные цели и задачи цифровой платформы как интегратора экосистемы в области повышения ресурсной и экологической эффективности на предприятиях:

- формирование пула лучших практик в области ресурсоэффективности для промышленных предприятий;
- разработка и продвижение инновационных решений в области ресурсоэффективности по полному циклу поддержки предприятий по всему жизненному циклу изделия;

- формирование экосистемного взаимодействия, объединяющего промышленные предприятия с партнерами и другими участниками на принципах ресурсоэффективности, НДТ, ESG;
- инструмент в продвижении инновационных решений в области повышения ресурсоэффективности по полному циклу поддержки предприятий по всему жизненному циклу изделия;
- формирование системы профессиональных и управленческих компетенций для акторов экосистемы на основе принципов НДТ, ESG, междисциплинарности, когнитивности и проектно-ориентированности, позволяющие принимать адекватные управленческие решения в сфере модернизации технологий и повышения ресурсоэффективности [17, 18, 25].

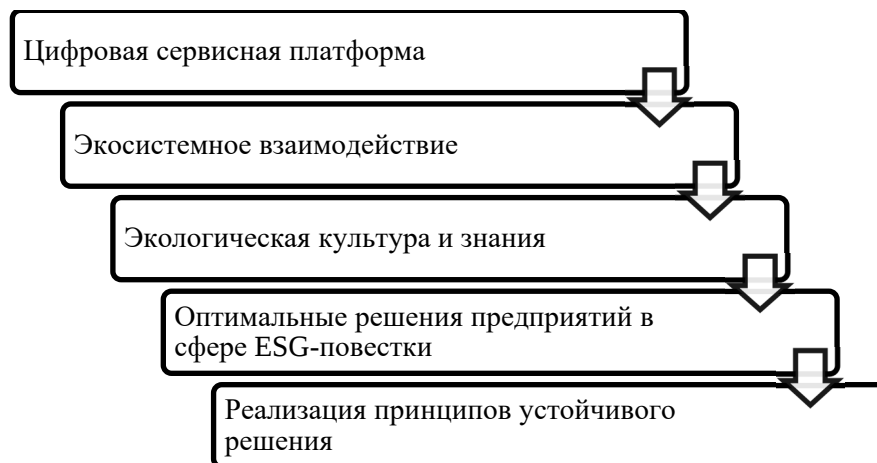


Рис. 1. Концептуальная причинно-следственная связь цифровой платформы, экосистемного взаимодействия и принципов устойчивого развития (составлено авторами)

Анализ и оценка цифровых экологических и промышленных платформ

Для разработки концепции цифровой платформы как интегратора экосистемного взаимодействия компаний в сфере ESG-повестки проведем обзор существующих промышленных и экологических платформ.

1. *Промышленная цифровая платформа (ПЦП) ZIIoT* (Zyfra Industrial Internet of Things Platform) предоставляет необходимый набор компонентов для создания и внедрения цифровых решений на предприятии [19]. Решения, разработанные и применяемые на базе ZIIoT, обеспечивают бесперебойную и эффективную работу промышленных предприятий. В табл. 1 представлены основные характеристики платформы.

ZIIoT – это прежде всего среда для сбора и работы с данными, куда их можно направить со всех производственных подразделений и со всех ИТ-систем, которые использует предприятие, привести полученные данные к единому формату и централизованно использовать их для более эффективного управления предприятием. Цифровая индустриальная платформа представляет собой технологический конструктор по созданию систем промышленной автоматизации, позволяющих партнерам самостоятельно разрабатывать

вертикальные промышленные приложения, решающие технологические задачи предприятий (рис. 2).

Таблица 1

Качественные характеристики (ПЦП) ZIIoT

Название платформы	Zyfra Industrial IoT (ZIIoT) Platform
Год основания	2020
Страна	Россия
Технология	Интернет вещей (IoT), аналитика данных и большие данные (Big data), искусственный интеллект (AI), машинное обучение (ML)
Функции	Мониторинг и управление производственными процессами, сбор и анализ данных, оптимизация эффективности
Цель	Повышение производительности, снижение затрат и рисков, оптимизация ресурсов
Партнеры	Ведущие компании России – ПАО «НЛМК», ООО «Евраз», ПАО «Лукойл», Государственная корпорация «Ростех», ПАО «МТС», ПАО «Газпром нефть» и др.
Регионы покрытия	Россия
Экологический эффект	Оптимизация производственных процессов, повышение ресурсной (в том числе энергетической) и экологической эффективности
Влияние на экономику	Оптимизация производственных процессов и ресурсов может привести к повышению экономической эффективности и снижению затрат
Инновационные решения	Применение передовых технологий IoT, аналитики данных и искусственного интеллекта, а также машинного обучения для оптимизации производства

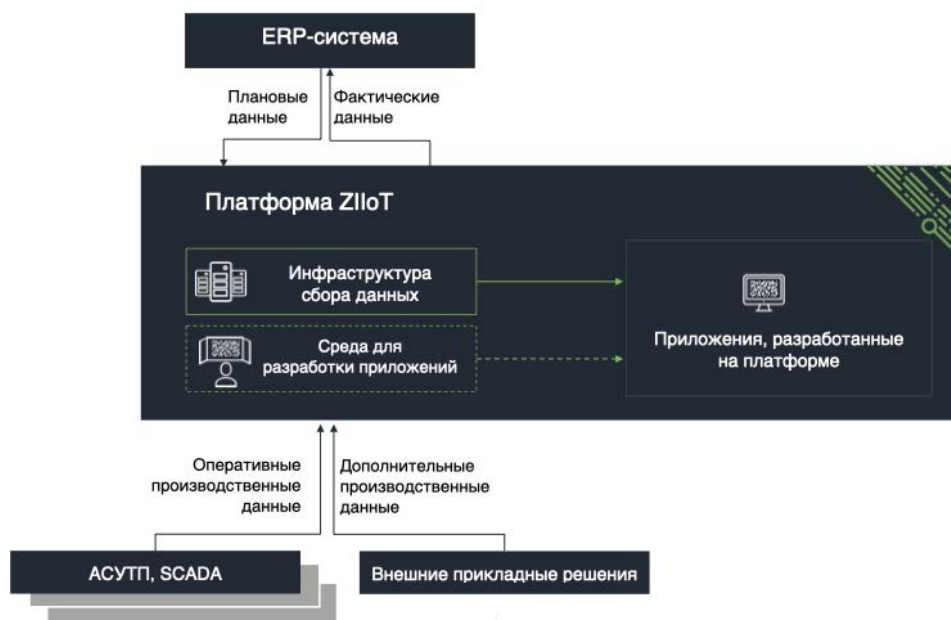


Рис. 2. Потоки данных на платформе ZIIoT

В ZIIoT используются:

- применение новых технологий. В основе ZIIoT лежат технологии AI, ML, IoT и Big data. Благодаря технологиям повышается производительность платформы и улучшается ее эффективность;
- централизованность процессов. Все процессы, осуществляемые на цифровой платформе, происходят на собственных мощностях платформы, а не в облачных ресурсах, обеспечивая безопасность работы и данных;
- расширяемость и гибкость. Платформа предлагает возможности расширения и интеграции с различным промышленным оборудованием, сенсорами и устройствами, что позволяет адаптировать решение под конкретные потребности предприятия.

Цифровая платформа ZIIoT предназначена для горной, химической, нефтегазовой, автомобильной и металлообрабатывающей промышленности, а также процессной индустрии. На рис. 2 схематически представлено, как работает данная цифровая платформа.

Цифровые решения платформы уже широко применяются на таких предприятиях, как ООО «Евраз», ПАО «Лукойл», Государственная корпорация «Ростех», ПАО «Газпром нефть» и др.

2. *Цифровая платформа Siemens Industrial Edge* представляет собой решение, разработанное компанией Siemens для промышленной автоматизации и оптимизации производственных процессов [20]. Она объединяет в себе облачные вычисления, аналитику данных и промышленное оборудование, позволяя предприятиям проводить вычисления и анализ данных непосредственно на промышленных устройствах, минуя облачные серверы. В табл. 2 представлены основные данные по промышленной цифровой платформе Siemens Industrial Edge.

Таблица 2

Качественные характеристики ПЦП ZIIoT «Siemens Industrial Edge»

Название платформы	Siemens Industrial Edge
Год основания	2019
Страна	Германия
Цифровая технология	Граничные (Edge) вычисления для промышленности, облачные технологии и Big Data
Функции	– Обработка данных на месте (локально) для быстрой реакции и минимизации задержек. – Интеграция с облачными решениями для анализа данных и принятия решений на их основе. – Поддержка различных промышленных протоколов и стандартов связи
Цель	Оптимизация производства, повышение эффективности и гибкости производственных процессов
Количество пользователей/компаний	Конкретные данные отсутствуют
Партнеры	Ведущие мировые компании, такие как Microsoft, AWS (Amazon Web Services), Hewlett Packard Enterprise (HP) и др.
Регионы покрытия	Международный уровень, включая Германию, США, Китай и другие страны

Экологический эффект	Оптимизация производственных процессов, повышение ресурсной (в том числе энергетической) и экологической эффективности
Влияние на экономику	Повышение эффективности и гибкости производства, снижение затрат и усиление конкурентоспособности
Инновационные решения	Использование граничных (Edge) вычислений, интеграция с облачными решениями и поддержка промышленных протоколов связи

Siemens Industrial Edge представляет собой цифровую платформу, которая обеспечивает возможности обработки данных, аналитики и оптимизации производственных процессов на промышленных устройствах (рис. 3). Платформа позволяет предприятиям повысить эффективность, надежность и безопасность своих производственных операций. В планах у компании создать промышленную метавселенную в лице усовершенствованного цифрового двойника.

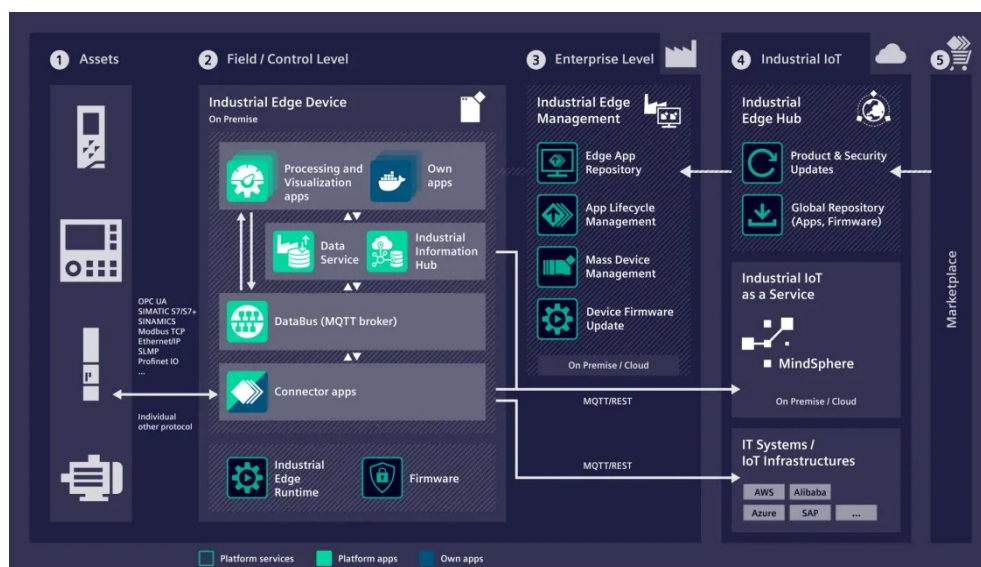


Рис. 3. Этапы обработки данных на ЦП Industrial Edge

На рис. 3 представлены этапы обработки данных в Industrial Edge:

- распределенные вычисления: Siemens Industrial Edge позволяет выполнять обработку данных и выполнение вычислительных задач непосредственно на промышленных контроллерах и устройствах, что позволяет достичь низкой задержки и повышенной производительности;
- аналитика данных: платформа позволяет проводить анализ данных в реальном времени, используя алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта. Это позволяет выявлять аномалии, оптимизировать производственные процессы и принимать оперативные решения на основе данных;
- интеграция с облачными решениями: Siemens Industrial Edge обеспечивает интеграцию с облачными платформами Siemens, такими как MindSphere,

что позволяет получать дополнительные возможности аналитики данных, хранение данных в облаке и удаленный доступ к промышленным устройствам;

– защита данных: платформа Siemens Industrial Edge обеспечивает высокий уровень защиты данных, включая шифрование, аутентификацию и контроль доступа. Это важно для обеспечения безопасности данных и предотвращения несанкционированного доступа.

3. Схожей ПЦП можно считать *платформу SAP Digital Manufacturing Cloud (SAP DMC)* от мирового лидера на рынке ERP систем компании SAP. Данная цифровая платформа предоставляет функционал, схожий с ранее рассмотренными платформами, однако она не сконцентрирована на промышленной отрасли, а делает свой продукт более гибким и универсальным [21]. В табл. 3 представлены основные данные по промышленной цифровой платформе GE Digital.

Таблица 3

Качественные характеристики ПЦП GE Digital

Название платформы	GE Digital
Год основания	2015
Страна	США
Технология	Big Data, IoT, AI
Функции	Управление промышленными данными, аналитика, прогнозирование, оптимизация операций
Цель	Улучшение производительности и эффективности в промышленных секторах
Партнеры	Различные промышленные компании, поставщики оборудования и услуг, среди которых Shell, Boeing, P&G
Регионы покрытия	Глобальное присутствие, активна в различных странах
Экологический эффект	Сокращение количества отходов, снижение негативного воздействия на окружающую среду, повышение эффективности использования ресурсов, формирование экономики замкнутого цикла
Влияние на экономику	Повышение производительности и эффективности промышленных предприятий, создание рабочих мест, содействие экономическому росту
Инновационные решения	Использование больших данных (Big Data) для аналитических и прогностических алгоритмов, внедрение технологий Интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (AI)

GE Digital представляет собой цифровую платформу, разработанную компанией General Electric для управления и оптимизации различных промышленных операций. Платформа предоставляет ряд инструментов и решений, позволяющих компаниям эффективно управлять своими активами, оптимизировать производственные процессы и принимать оперативные решения на основе данных:

– цифровой двойник: GE Digital позволяет создавать цифровых двойников физических объектов, таких как оборудование, производственные линии и системы. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального объекта, которая отображает его состояние, производительность и другие

параметры. Это позволяет предприятиям визуализировать и анализировать данные о своих активах и принимать обоснованные решения на основе этой информации;

– аналитика данных: платформа предоставляет возможности анализа данных с использованием алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Это позволяет предприятиям выявлять аномалии, оптимизировать производственные процессы, прогнозировать отказы оборудования и предпринимать меры для предотвращения сбоев;

– интеграция данных: платформа GE Digital интегрируется с различными источниками данных в предприятии, включая промышленное оборудование, системы управления производством и другие цифровые ресурсы. Это позволяет предприятиям собирать, агрегировать и анализировать данные из разных источников для получения полной картины производственных операций.

GE Digital является одним из ведущих поставщиков цифровых решений для промышленных предприятий и предлагает комплексные инструменты и платформы для оптимизации и улучшения производственных процессов.

4. Экологическая цифровая платформа (ЭЦП) «Снова в дело»

Платформа «Снова в дело» является экологической цифровой платформой, разработанной для организации процесса утилизации и переработки вторсырья в России. Платформа помогает связать поставщиков вторсырья, перерабатывающие предприятия и потребителей, чтобы сделать процесс утилизации более эффективным и экологически устойчивым [22]. В табл. 4 представлены основные данные по экологической цифровой платформе «Снова в дело».

Таблица 4

Качественные характеристики ЭЦП «Снова в дело»

Название платформы	Снова в дело
Год основания	2018
Страна	Россия
Технология	Цифровая
Функции	Поиск и продажа вторсырья, организация утилизации и переработки отходов, сокращение экологического воздействия
Цель	Содействие экологической устойчивости и переработке отходов
Количество пользователей	Зарегистрировано 1267 участников, проведено 25 сделок на общую сумму 11 млн руб.
Партнеры	Различные организации, предприятия и учреждения, занимающиеся утилизацией и переработкой отходов
Регионы покрытия	Россия (в настоящее время активно развивается в Москве)
Экологический эффект	Сокращение количества отходов, улучшение качества окружающей среды, повышение эффективности использования ресурсов
Влияние на экономику	Поощрение экономики вторсырья и утилизационной индустрии, создание рабочих мест
Инновационные решения	Использование цифровых технологий, автоматизация процессов, внедрение умных систем управления

Основные функции ЭЦП «Снова в дело»:

- онлайн торговая площадка: платформа предоставляет онлайн торговую площадку, где поставщики вторсырья могут размещать информацию о своих материалах и продуктах, а перерабатывающие предприятия и потребители могут находить подходящие поставки и совершать сделки. Это помогает оптимизировать процесс сбора и переработки вторсырья;
- мониторинг и учет: платформа позволяет отслеживать и учитывать объемы собранного вторсырья, его качество и состояние. Это помогает организовать эффективное управление материалами и обеспечить прозрачность процесса утилизации;
- автоматизация и оптимизация: ЭЦП использует такие цифровые технологии, как автоматизация процессов и аналитика данных, чтобы помочь компаниям оптимизировать свои операции и сделать процесс утилизации более эффективным. Это может включать автоматическое определение оптимальных маршрутов сбора вторсырья, прогнозирование спроса и предложения, а также оптимизацию процессов переработки.

Экологическая цифровая платформа "Снова в Дело" является инновационным решением, которое способствует оптимизации и улучшению процесса утилизации вторсырья, внося вклад в экологическую устойчивость и улучшение общей эффективности системы управления отходами.

5. ЭЦП *Materiaalitori* была разработана с целью создания эффективной и устойчивой системы управления строительными ресурсами, снижения отходов и стимулирования переработки материалов. В табл. 5 представлены основные данные по платформе «Materiaalitori».

Таблица 5

Качественные характеристики ЭЦП «Materiaalitori»

Название платформы	Materiaalitori
Год основания	2017
Страна	Финляндия
Технология	Интернет вещей, блокчейн
Функции	Онлайн-рынок вторичных материалов, соединение продавцов и покупателей, аналитика и отчетность, блокчейн-технология
Цель	Содействие переработке и вторичной переработке материалов для снижения воздействия на окружающую среду
Количество пользователей	2342 зарегистрированных пользователя и 1890 компаний/организаций
Партнеры	Компании, занимающиеся производством и переработкой материалов
Регионы покрытия	Платформа активна в Финляндии, планирует расширение своей деятельности на международный рынок
Экологический эффект	Способствует сокращению отходов и повышению эффективности использования ресурсов, формированию экономики замкнутого цикла
Влияние на экономику	Способствует развитию зеленой экономики, экономики замкнутого цикла, созданию новых рабочих мест и экономическому росту
Инновационные решения	Использует инновационные подходы и технологии для эффективной переработки и утилизации различных материалов

ЭЦП «Materiaalitori» позволяет реализовывать следующие функции:

- обмен материалами: ЭЦП предоставляет возможность размещать информацию о доступных строительных материалах и ресурсах, которые могут быть использованы повторно или переработаны, что позволяет компаниям находить подходящие материалы для своих проектов, сокращая потребность в новых материалах и снижая объемы отходов;

- аналитика и отчетность: ЭЦП предоставляет аналитические инструменты и возможности отчетности, позволяющие компаниям оценивать и оптимизировать свою деятельность в области управления строительными ресурсами, что помогает выявить потенциал для улучшения эффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду;

- устойчивость и экологическая ответственность: Materiaalitori способствует повышению устойчивости строительной индустрии, уменьшению ее негативного воздействия на окружающую среду, поддержанию принципов циркулярной экономики и стимулированию перехода к более устойчивым практикам использования ресурсов.

В целом платформа Materiaalitori предоставляет цифровые инструменты и решения, которые способствуют оптимизации использования строительных материалов, сокращению отходов и переработке ресурсов [23]. Она играет важную роль в развитии устойчивой строительной индустрии и способствует достижению экологических целей.

6. ЭЦП *Plastic Bank* – платформа, целью разработки которой стала борьба с загрязнением пластиковыми отходами.

В табл. 6 представлены основные данные по экологической цифровой платформе «Plastic Bank».

Таблица 6

Качественные характеристики ЭЦП «Plastic Bank»

Название платформы	Plastic Bank
Год основания	2013
Страна	Канада
Технология	Блокчейн, мобильные приложения
Функции	Сбор пластиковых отходов, блокчейн-технология, социальный аспект, цифровая валюта
Цель	Решение проблемы пластиковых отходов и поощрение устойчивого потребления
Количество пользователей	Более 150 компаний партнеров
Партнеры	Крупные компании и малый бизнес, включая производителей упаковки и товаров, магазины, организации социального предпринимательства, среди которых Electrolux, 3M и Henkel
Регионы покрытия	Платформа активна в некоторых странах мира, включая Гаити, Филиппины, Бразилию, Колумбию и др.
Экологический эффект	Способствует снижению загрязнения окружающей среды пластиковыми отходами и повышению переработки пластика
Влияние на экономику	Способствует борьбе с бедностью и созданию экономических возможностей для уязвимых групп населения
Инновационные решения	Применяет инновационные технологии блокчейн и мобильных приложений для создания прозрачной и эффективной системы управления пластиковыми отходами

ЭЦП реализует следующие функции:

- сбор и утилизация пластиковых отходов: Plastic Bank разрабатывает и применяет цифровые решения для организации сбора и утилизации пластиковых отходов. Пользователи могут сдавать пластиковые отходы на специальных пунктах сбора, где они получают вознаграждение в виде цифровой валюты [24]. В 2022 г. Plastic Bank отчитался о 2 млрд собранных пластиковых бутылок или более 85 млн кг пластика;

- партнерство с предприятиями: Plastic Bank устанавливает партнерские отношения с предприятиями и организациями, которые заинтересованы в утилизации пластиковых отходов, что позволяет предприятиям использовать пластиковые отходы в своих производственных процессах или в качестве сырья для производства экологических продуктов;

- технологические решения: Plastic Bank использует цифровые и технологические инструменты для облегчения сбора, учета и управления пластиковыми отходами, что позволяет включать мобильные приложения, и онлайн-платформы в системы учета на предприятиях.

Опыт уже реализованных и доказавших свою эффективность ПЦП и ЭЦП позволяет сделать вывод, что при разработке сервисной цифровой платформы необходимо делать акцент на открытость, защищенность, использование искусственного интеллекта, машинного обучения и технологий блокчейна.

Основным документом в области цифровизации экологии является «Стратегическое направление в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования» [26]. Документ предусматривает внедрение следующих технологий: искусственный интеллект; дистанционное зондирование Земли и беспилотный летательный аппарат; технология Интернета вещей; цифровой двойник. Активно разрабатывается раздел «Экология» на платформе «ГосТех». По плану домен «Экология» будет объединять 20 сервисов в сферах экологии, включая следующие отрасли: природопользование; обращение с отходами; мониторинг окружающей среды; охота и рыбалка; путешествия по особо охраняемым природным территориям.

Таким образом, стратегия цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования направлена на реализацию комплекса мероприятий по повышению эффективности использования природных ресурсов и обеспечения контроля и мониторинга за состоянием окружающей среды на территории Российской Федерации.

Заключение и выводы

В данной статье предпринята попытка проанализировать международный и российский опыт функционирования промышленных и экологических платформ, созданных с целью повышения ресурсной и экологической эффективности хозяйствующих субъектов. Формирование таких платформ требует более глубокого исследования, особенно в контексте ресурсоэффективности, НДТ и ESG-трансформации. Такой подход объединяет понятие «цифровая платформа» с институциональными механизмами формирования инновационной инфраструктуры и обеспечения трансфера знаний и технологий. Формирование экосистемной инфраструктуры является неотъемлемой частью реализации экосистемных моделей. Как правило, участники и потребители связаны

через общую цифровую платформу или интегрируют свои сервисы в единые цифровые приложения. Таким образом, цифровая экосистема позволяет осуществлять диагностику деятельности акторов, выявлять потенциальные вызовы и угрозы и моделировать оптимальные стратегии устойчивого развития.

Развитие экосистемной интеграции промышленных предприятий через увеличение количества совместных инновационных технологических и экологических проектов позволит реализовать ресурсоэффективную промышленную политику.

Список литературы

1. Korovin G. B. Network structures in the regional industry // *Economy of Regions*. 2020. Vol. 16. P. 1132–1146. doi: 10.17059/ekon.reg.2020-4-9
2. Anjos F. Resource configuration, inter-firm works, and organizational performance // *Mathematical Social Sciences*. 2016. Vol. 82. P. 37–48. doi: 10.1016/j.math-socsci.2016.04.003
3. Gulati R., Lavie D., Madhavan R. How do networks matter? The performance effects of interorganizational networks // *Research in Organizational Behavior*. 2011. Vol. 31. P. 207–224. doi: 10.1016/j.riob.2011.09.005
4. Wang G., Yang J., Xu F. Analyzing Express Revenue Spatial Association Network's Characteristics and Effects: A Case Study of 31 Provinces in China // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 276. doi: 10.3390/su15010276
5. Ahmed S., Singh M., Doherty B. [et al.]. An Empirical Analysis of State-of-Art Classification Models in an IT Incident Severity Prediction Framework // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 3843. doi: 10.3390/app13063843
6. Bolshakov N., Badenko V., Yadykin V. [et al.]. Cross-Industry Principles for Digital Representations of Complex Technical Systems in the Context of the MBSE Approach: A Review // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 6225. doi: 10.3390/app13106225
7. Ma Y., Zhao R., Yin N. Application of an Improved Link Prediction Algorithm Based on Complex Network in Industrial Structure Adjustment // *Processes*. 2023. Vol. 11. P. 1689. doi: 10.3390/pr11061689
8. Nogueira P., Pereira L., Simões A. [et al.]. Vertical Integration Dynamics to Innovate in Technology Business // *Informatics*. 2023. Vol. 10. P. 25. doi: 10.3390/informat-ics10010025
9. Толстых Т. О., Шмелева Н. В., Гамидуллаева Л. А., Краснобаева В. С. Роль коллаборации в развитии интеграции промышленных предприятий // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2023. № 1. С. 5–36. doi: 10.21685/2227-8486-2023-1-1
10. Gamidullaeva L., Tolstykh T., Bystrov A. [et al.]. Cross-Sectoral Digital Platform as a Tool for Innovation Ecosystem Development // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. P. 11686.
11. Tolstykh T., Gamidullaeva L., Shmeleva N. [et al.]. Megapolis as a Symbiosis of Socio-Economic Ecosystems: The Role of Collaboration // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2022. Vol. 8, iss. 3. P. 126.
12. Shinkevich A. I., Ershova I. G., Galimulina F. F. Forecasting the Efficiency of Innovative Industrial Systems Based on Neural Networks // *Mathematics*. 2023. Vol. 11, № 1. P. 164. doi: 10.3390/math11010164
13. Ершова И. Г., Каракулин А. Ю. Управление трансформацией экосистем в цифровой инновационной среде // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2022. № 3. С. 79–84. doi: 10.37493/2307-907X.2022.3.10
14. Kovalchuk Yu. A., Stepnov I. M., Petrovic T. Evolution of Digital Platforms to Ecosystems: Is the Digital Paradox Real? // *The Platform Economy : Designing a Supranational Legal Framework*. Singapore : Palgrave Macmillan, 2022. P. 37–48. doi: 10.1007/978-981-19-3242-7_3

15. Степнов И. М., Ковальчук Ю. А. «Зеленые» стратегии и цифровые решения: дивергенция или конвергенция? // Друкеровский вестник. 2022. № 1. С. 54–62. doi: 10.17213/2312-6469-2022-1-54-62
16. Скобелев Д. О., Доброхотова М. В., Курошев И. С. Оценки ресурсной эффективности промышленного производства. Энциклопедия технологий // Качество и жизнь. 2019. № 4. С. 66–69.
17. Скобелев Д. О. Промышленная политика повышения ресурсоэффективности и достижение целей устойчивого развития // Journal of New Economy. 2020. Т. 21, № 4. С. 153–173.
18. Скобелев Д. О. Наилучшие доступные технологии: опыт повышения ресурсной и экологической эффективности производства. М. : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2020.
19. О платформе ZIIoT // Zyfra. URL: <https://www.zyfra.com> (дата обращения: 15.05.2023).
20. О платформе Siemens Industrial Edge // Siemens. URL: <https://www.siemens.com> (дата обращения: 15.05.2023).
21. О платформе GE Digital // General Electric. URL: <https://www.ge.com> (дата обращения: 17.05.2023).
22. О проекте «Снова в дело» // Снова в дело. URL: <https://snovavdelo.ru> (дата обращения: 23.05.2023).
23. О платформе «Materiaalitori» // Materiaalitori. URL: <https://www.materiaalitori.fi> (дата обращения: 24.05.2023).
24. О платформе «Plastic bank» // Plastic bank. URL: <https://plasticbank.com> (дата обращения: 21.05.2023).
25. Скобелев Д. О., Волосатова А. А., Гусева Т. В., Панова С. В. Применение концепции наилучших доступных технологий в различных системах зеленого финансирования: международный опыт и перспективы использования в государствах-членах Евразийского экономического союза // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 2. С. 33.
26. Стратегическое направление в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования : распоряжение Правительства Российской Федерации № 3496-р от 08.12.2021.

References

1. Korovin G.B. Network structures in the regional industry. *Economy of Regions*. 2020;16:1132–1146. doi: 10.17059/ekon.reg.2020-4-9
2. Anjos F. Resource configuration, inter-firm works, and organizational performance. *Mathematical Social Sciences*. 2016;82:37–48. doi: 10.1016/j.mathsocsci.2016.04.003
3. Gulati R., Lavie D., Madhavan R. How do networks matter? The performance effects of interorganizational networks. *Research in Organizational Behavior*. 2011;31:207–224. doi: 10.1016/j.riob.2011.09.005
4. Wang G., Yang J., Xu F. Analyzing Express Revenue Spatial Association Network's Characteristics and Effects: A Case Study of 31 Provinces in China. *Sustainability*. 2023;15:276. doi: 10.3390/su15010276
5. Ahmed S., Singh M., Doherty B. et al. An Empirical Analysis of State-of-Art Classification Models in an IT Incident Severity Prediction Framework. *Applied Sciences*. 2023;13:3843. doi: 10.3390/app13063843
6. Bolshakov N., Badenko V., Yadykin V. et al. Cross-Industry Principles for Digital Representations of Complex Technical Systems in the Context of the MBSE Approach: A Review. *Applied Sciences*. 2023;13:6225. doi: 10.3390/app13106225
7. Ma Y., Zhao R., Yin N. Application of an Improved Link Prediction Algorithm Based on Complex Network in Industrial Structure Adjustment. *Processes*. 2023;11:1689. doi: 10.3390/pr11061689

8. Nogueira P., Pereira L., Simões A. et al. Vertical Integration Dynamics to Innovate in Technology Business. *Informatics*. 2023;10:25. doi: 10.3390/informatics10010025
9. Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Gamidullaeva L.A., Krasnobaeva V.S. The role of collaboration in the development of integration of industrial enterprises. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):5–36. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-1-1
10. Gamidullaeva L., Tolstykh T., Bystrov A. et al. Cross-Sectoral Digital Platform as a Tool for Innovation Ecosystem Development. *Sustainability*. 2021;13:11686.
11. Tolstykh T., Gamidullaeva L., Shmeleva N. et al. Megapolis as a Symbiosis of Socio-Economic Ecosystems: The Role of Collaboration. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2022;8(3):126.
12. Shinkevich A.I., Ershova I.G., Galimulina F.F. Forecasting the Efficiency of Innovative Industrial Systems Based on Neural Networks. *Mathematics*. 2023;11(1):164. doi: 10.3390/math11010164
13. Ershova I.G., Karakulin A.Yu. Management of ecosystem transformation in the digital innovation environment. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta = Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2022;(3):79–84. (In Russ.). doi: 10.37493/2307-907X.2022.3.10
14. Kovalchuk Yu.A., Stepnov I.M., Petrovic T. Evolution of Digital Platforms to Ecosystems: Is the Digital Paradox Real? *The Platform Economy: Designing a Supranational Legal Framework*. Singapore: Palgrave Macmillan, 2022:37–48. doi: 10.1007/978-981-19-3242-7_3
15. Stepnov I.M., Koval'chuk Yu.A. "Green" strategies and digital solutions: divergence or convergence? *Drukerovskiy vestnik = Drucker's Bulletin*. 2022;(1):54–62. (In Russ.). doi: 10.17213/2312-6469-2022-1-54-62
16. Skobelev D.O., Dobrokhotova M.V., Kuroshev I.S. Estimates of resource efficiency of industrial production. *Encyclopedia of Technologies. Kachestvo i zhizn' = Quality and life*. 2019;(4):66–69. (In Russ.)
17. Skobelev D.O. Industrial policy of increasing resource efficiency and achieving sustainable development goals. *Journal of New Economy*. 2020;21(4):153–173. (In Russ.)
18. Skobelev D.O. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii: opyt povysheniya resursnoy i ekologicheskoy effektivnosti proizvodstva = The best available technologies: experience in improving resource and environmental efficiency of production*. Moscow: Akademiya standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2020. (In Russ.)
19. About the ZIIoT platform. *Zyfra = Zyfra*. (In Russ.). Available at: <https://www.zyfra.com> (accessed 15.05.2023).
20. About the Siemens Industrial Edge platform. *Siemens*. (In Russ.). Available at: <https://www.siemens.com> (accessed 15.05.2023).
21. About the GE Digital platform. *General Electric*. (In Russ.). Available at: <https://www.ge.com> (accessed 17.05.2023).
22. About the project "Back to business". *Snova v delo = Back to business*. (In Russ.). Available at: <https://snovavdelo.ru> (accessed).
23. About the platform "Materiaalitori". *Materiaalitori*. (In Russ.). Available at: <https://www.materiaalitori.fi> (accessed 24.05.2023).
24. About the platform "Plastic bank". *Plastic bank*. (In Russ.). Available at: <https://plasticbank.com> (accessed 21.05.2023).
25. Skobelev D.O., Volosatova A.A., Guseva T.V., Panova S.V. Application of the concept of the best available technologies in various green finance systems: international experience and prospects for use in the member States of the Eurasian Economic Union. *Vestnik evraziyskoy nauki = Bulletin of Eurasian Science*. 2022;14(2):33. (In Russ.)
26. *Strategicheskoe napravlenie v oblasti tsifrovoy transformatsii otrasli ekologii i prirodopol'zovaniya: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 3496-r ot*

08.12.2021 = *Strategic direction in the field of digital transformation of the ecology and nature management industry: Decree of the Government of the Russian Federation No. 3496-r dated 08.12.2021.* (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Олеговна Толстых

доктор экономических наук,
профессор кафедры индустриальной
стратегии,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-кт, 4)
E-mail: tt400@mail.ru

Tatyana O. Tolstykh

Doctor of economical sciences,
professor of the sub-department
of industrial strategy,
National Research Technological University
"MISIS"
(4 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Надежда Васильевна Шмелева

кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры индустриальной
стратегии,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-кт, 4)
E-mail: nshmeleva@misis.ru

Nadezhda V. Shmeleva

Candidate of economical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of industrial strategy,
National Research Technological University
"MISIS"
(4 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Иван Геннадиевич Супруненко

аспирант кафедры индустриальной
стратегии,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-кт, 4)
E-mail: suprunenko123@mail.ru

Ivan G. Suprunenko

Postgraduate student
of the sub-department of industrial strategy,
National Research Technological University
"MISIS"
(4 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Илья Сергеевич Курошев

начальник отдела металлургической,
нефтегазовой и горнорудной
промышленности,
Центр экологической
промышленной политики
(Россия, г. Москва,
Стремянный переулок, 38)
E-mail: i.kuroshev@eipc.center

Ilya S. Kuroshev

Head of the department of metallurgy,
oil and gas, and mining,
Environmental Industrial Policy Centre
(38 Stremyanny lane, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 24.07.2023

Поступила после рецензирования/Revised 25.08.2023

Принята к публикации/Accepted 26.08.2023

ТЕОРИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. И. Шинкевич¹, С. С. Кудрявцева², Д. В. Харитонов³

^{1, 2} Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

³ Обнинское научно-производственное предприятие
«Технология» имени А. Г. Ромашина, Обнинск, Россия

¹ ashinkevich@mail.ru, ² sveta516@yandex.ru, ³ haritonov.d1978@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются теории ограничений применительно к специфике функционирования научно-производственных предприятий. Анализируются тренды работы научно-производственной сферы. Цель исследования состоит в систематизации научных подходов к применению теории ограничений для работы научно-производственных предприятий, выявлении трендов их развития и выработке системных характеристик «узких мест» инновационной деятельности научно-производственных предприятий. *Материалы и методы.* Информационную базу исследования составили теория фирмы, теория организации промышленного производства, технологическая теория, теория кластерных моделей, теория бережливого производства, теория инноваций. В качестве статистической базы использовались данные официальной статистики. Динамический ряд для сопоставительной оценки составлял 2017–2022 гг. В качестве методов исследования применены описание, сравнительный и сопоставительный анализ, анализ динамических рядов, методы описательной статистики, анализ трендов, регрессионный анализ, методы анализа, синтеза и обобщения. *Результаты.* Систематизированы этапы работы с «узкими местами» в теории ограничений для научно-производственных предприятий. Разработана классификация ограничений («узких мест») инновационной деятельности научно-производственных предприятий. *Выводы.* Принципиальное отличие предлагаемого подхода заключается в совершенствовании методических основ определения и устранения ограничений различного характера в функционировании научно-производственных предприятий.

Ключевые слова: теория ограничений, научно-производственное предприятие, инновации, затраты на научные исследования и разработки, проектно-конструкторские работы

Финансирование: исследование выполнено в рамках гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ № НШ-1886.2022.2.

Для цитирования: Шинкевич А. И., Кудрявцева С. С., Харитонов Д. В. Теория ограничений в функционировании научно-производственных предприятий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 70–80. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-5

THEORY OF LIMITS IN THE FUNCTIONING OF SCIENTIFIC AND PRODUCTION ENTERPRISES

A.I. Shinkevich¹, S.S. Kudryavtseva², D.V. Kharitonov³

^{1, 2} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

³ Obninsk Scientific and Production Enterprise "Technology"
named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia

¹ ashinkevich@mail.ru, ² sveta516@yandex.ru, ³ kharitonov.d1978@yandex.ru

Abstract. *Background.* The article deals with the theory of constraints in relation to the specifics of the functioning of research and production enterprises. The trends in the work of the research and production sphere are analyzed. The purpose of the article is to systematize scientific approaches to the application of the theory of constraints for the work of research and production enterprises, to identify trends in their development and to develop systemic characteristics of the "bottlenecks" in the innovation activity of research and production enterprises. *Materials and methods.* The information base of the study was the theory of the firm, the theory of organization of industrial production, technological theory, the theory of cluster models, the theory of lean production, and the theory of innovation. Official statistics were used as the statistical base. The time series for comparative assessment was 2017–2022. Description, comparative and comparative analysis, time series analysis, descriptive statistics methods, trend analysis, regression analysis, methods of analysis, synthesis and generalization are used as research methods in the article. *Results.* The stages of work with "bottlenecks" in the theory of constraints for research and production enterprises are systematized. A classification of limitations ("bottlenecks") of innovative activity of research and production enterprises has been developed. *Conclusions.* The fundamental difference of the proposed approach lies in the improvement of the methodological foundations for determining and eliminating restrictions of a different nature in the functioning of research and production enterprises.

Keywords: theory of constraints, research and production enterprise, innovations, research and development costs, design work

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of a grant from the President of the Russian Federation for state support of leading scientific schools of the Russian Federation № NSH-1886.2022.2.

For citation: Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Kharitonov D.V. Theory of limits in the functioning of scientific and production enterprises. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):70–80. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-5

Введение

Практика функционирования предприятий наукоемких производств в части инновационной деятельности с позиции системного подхода к управлению имеет ряд ограничений, продиктованных как внутренними, так и внешними факторами. В настоящее время в теории и практике управления существует и получила наибольшее распространение методология ограничений инновационной деятельности, предложенная Э. Голдраттом [1–3].

Данные теоретические положения были разработаны как инструмент оптимизации инновационных процессов при достижении цели инновационной деятельности. Основным методологическим основанием теории ограничений является необходимость определения факторов, или «узких мест», ограничивающих инновационную деятельность, как основы для оптимизации инновационных процессов – задачи первого уровня, при этом вопросы поиска резервов для прироста производительности рассматриваются как задачи второго

уровня. Полагаем, что данная теория ограничений применима и для научно-производственных предприятий при организации инновационных процессов.

Востребованным для предприятий научно-производственной сферы является формирование стратегий инновационного развития, основанных на структурно-сбалансированном научно-техническом и производственном развитии предприятия, предполагающего оптимизацию его подсистем. В данном случае речь идет о ресурсно-перерабатывающей модели инновационного развития российской экономики [4]. Теоретическую базу для ресурсно-сырьевой модели инновационного развития образует кластерный подход к управлению, предложенный М. Портером [5], где научно-производственные предприятия для преодоления ограничений инновационной деятельности кооперируются с предприятиями других секторов экономики, позволяющими эффективно использовать внутренние ресурсы для повышения конкурентоспособности и инновационности производства. Полагаем, что преодоление ограничений инновационной деятельности для научно-производственных предприятий возможно рассматривать в рамках предпринимательской теории фирмы Й. Шумпетера [6], которая позволяет выявлять резервы и механизмы преодоления ресурсных ограничений посредством формирования новых идей, выступающих источником инновационных благ.

В технологической теории (Д. Робинсон, Д. Хикс, Э. Чемберлин и др.) акцент делается на оптимизацию издержек производства инновационной деятельности при заданном объеме выпуска инновационной продукции. Следовательно, в технологической теории первостепенная роль в преодолении ограничений отводится особенностям организации производственных процессов – процессным инновациям. Напротив, в стратегической теории (Г. Минцберг, К. Эндрюс, И. Ансофф, Д. Куинн, М. Портер и др.) на первое место выдвигаются новые способы организации производства – организационные инновации, включающие систему принятия управленческих решений, когнитивные, аналитические и мотивационные характеристики организации инновационной деятельности.

В теории организации промышленности, предложенной Ж. Тиролем [7], проблематика преодоления ограничений в инновационной деятельности научно-производственных предприятий анализируется с четырех позиций:

- 1) масштаб, вид экономической деятельности;
- 2) размер рыночной власти, властная дистанция;
- 3) ценовая и неценовая конкуренция;
- 4) стабильность, уровень развития кооперационных связей научно-производственных предприятий с государством.

В преодолении ограничений инновационной деятельности следует упомянуть институциональную теорию фирмы, где научно-производственное предприятие следует рассматривать как самостоятельную институциональную единицу, характеризующуюся наличием организационных границ, созданную для достижения целей, в том числе в сфере инновационной деятельности, действующую в условиях ограниченных ресурсов [8].

Однако в настоящее время в научной литературе отечественных авторов проблематика изучения специфики теории ограничений с позиции функционирования научно-производственных предприятий только начинается пристально изучаться, что определяет актуальность тематики исследования данной статьи. Таким образом, цель статьи состоит в систематизации научных подходов к применению теории ограничений для работы научно-производственных предприятий, выявлении трендов их развития и выработке системных характеристик «узких мест» инновационной деятельности научно-производственных предприятий.

Материалы и методы

Информационную базу исследования составили теория фирмы, теория организации промышленного производства, технологическая теория, теория кластерных моделей, теория бережливого производства, теория инноваций. В качестве статистической базы использовались данные официальной статистики. Динамический ряд для сопоставительной оценки составил 2017–2022 гг. В качестве методов исследования в статье применены описание, сравнительный и сопоставительный анализ, анализ динамических рядов, методы описательной статистики, анализ трендов, регрессионный анализ, методы анализа, синтеза и обобщения.

Результаты и обсуждение

В среднем за 2017–2022 гг. число промышленных организаций, имевших научно-исследовательские, проектно-конструкторские подразделения, выполнявших научные исследования и разработки, составляло 430 единиц со средней численностью работников 59,3 тыс. человек. Наибольшее число промышленных организаций, имевших научно-исследовательские, проектно-конструкторские подразделения, выполнявших научные исследования и разработки, отмечалось в 2019 г. – 450 единиц с численностью работников, выполняющих НИР, 58 тыс. человек. По предварительной оценке, число промышленных организаций, имевших научно-исследовательские, проектно-конструкторские подразделения, выполнявших научные исследования и разработки, в 2022 г. составило 443 единицы с численностью сотрудников, выполняющих НИР, 61,9 тыс. человек, что составляет к уровню 2021 г. 99,6 % и 102,2 %, соответственно, к уровню 2017 г., принятого за базу сравнения – 116,6 % и 104,1 % (рис. 1).



Рис. 1. Динамика числа промышленных организаций, имевших научно-исследовательские, проектно-конструкторские подразделения, выполнявших научные исследования и разработки (составлено авторами по данным Росстата¹)

¹ Промышленное производство в России. 2021 : стат. сб. / Росстат. М., 2021. 305 с. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 12.05.2023).

Объем выполненных научно-технических работ в среднем за 2017–2022 гг. в расчете на одно промышленное предприятие, имеющее подразделение НИОКР, составлял 792 млн руб., в расчете на одного работника – 6 млн руб. Анализ динамики объема выполненных научно-технических работ в расчете на одно промышленное предприятие, имеющее подразделение НИОКР, имел поступательную тенденцию к росту, начиная с 2018 г. и достиг в 2022 г. 820 млн руб., что выше уровня 2021 г. на 1,2 %, но меньше показателя 2017 г. на 6,4 %. Однако нестабильность динамики наблюдалась по объему выполненных научно-технических работ в расчете на одного работника, поскольку периоды роста показателя сопровождались его снижением. В 2022 г. объем выполненных научно-технических работ в расчете на одного работника составил 5,9 млн руб., что соответствовало уровню 2021 г. и было выше показателя 2017 г. на 4,7 % (рис. 2).



Рис. 2. Динамика объема выполненных научно-исследовательских работ (составлено авторами по данным Росстата¹)

В структуре затрат на научные исследования и разработки в научно-исследовательских и опытно-конструкторских подразделениях промышленных организаций 92,3 % приходилось на внутренние текущие затраты, из них 29,9 % – оплата труда персонала; 7,7 % составляли капитальные затраты, из которых 3,6 % – оборудование, 1,6 % – объекты интеллектуальной собственности. По предварительной оценке, в 2022 г. затраты на научные исследования и разработки в научно-исследовательских и опытно-конструкторских подразделениях промышленных организаций составили 164,1 млрд руб., увеличившись по сравнению с 2021 г. на 21 %, по сравнению с 2017 г. – на 81,9 % (рис. 3).

¹ Промышленное производство в России. 2021 : стат. сб. / Росстат. М., 2021. 305 с. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 12.05.2023).

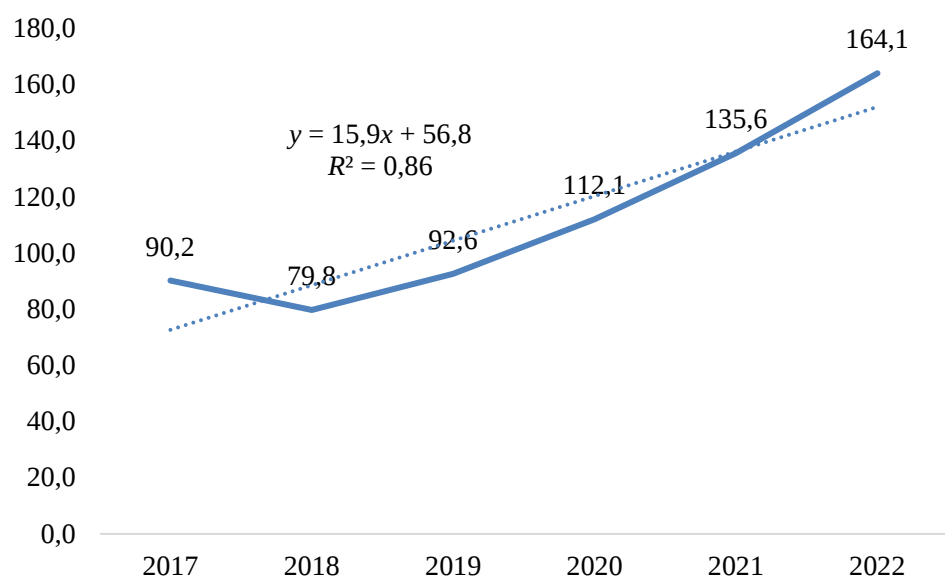


Рис. 3. Динамика затрат на научные исследования и разработки в научно-исследовательских и опытно-конструкторских подразделениях промышленных организаций (млрд руб.) (составлено авторами по данным Росстата¹)

Представим основные положения теории ограничений применительно к научно-производственным предприятиям. Так, теория ограничений основана на следующих принципах:

- принцип эмерджентности, когда достижение локальных оптимумов не является гарантией достижения глобального оптимума;
- инновационная система как сложная система в своей деятельности зависит от совокупности факторов и причинно-следственных связей, управляющее воздействие на которые способствует устранению «узких мест»;
- несводимости частей к целому. Так, необходимо принимать во внимание, что воздействие на отдельные локальные аспекты инновационных процессов научно-производственного предприятия для достижения максимальной эффективности инновационной деятельности может иметь отрицательное влияние на достижение целей инновационной деятельности на предприятии в целом в силу ограничения пропускной способности «узких мест».

Как показывают исследования, теория ограничений применима для научно-производственных предприятий, имеющих широкий спектр бизнес-процессов, для которых первостепенную актуальность имеет вопрос выстраивания кооперационных цепочек создания высокотехнологичной и наукоемкой продукции [9–12].

В рамках теории ограничений оптимизация бизнес-процессов осуществляется посредством реализации пяти последовательных шагов, выстроенных по замкнутому циклу:

- 1) определение «узких мест» системы;

¹ Промышленное производство в России. 2021 : стат. сб. / Росстат. М., 2021. 305 с. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 12.05.2023).

- 2) достижение наибольшей эффективности в устранении «узких мест»;
- 3) обеспечение баланса (синхронизация) функционирования остальных элементов системы с ритмом функционирования элемента-ограничителя;
- 4) в случае необходимости расширение перечня «узких мест»;
- 5) возвращение к первому этапу и выявление новых «узких мест» для повышения производительности системы (рис. 4).

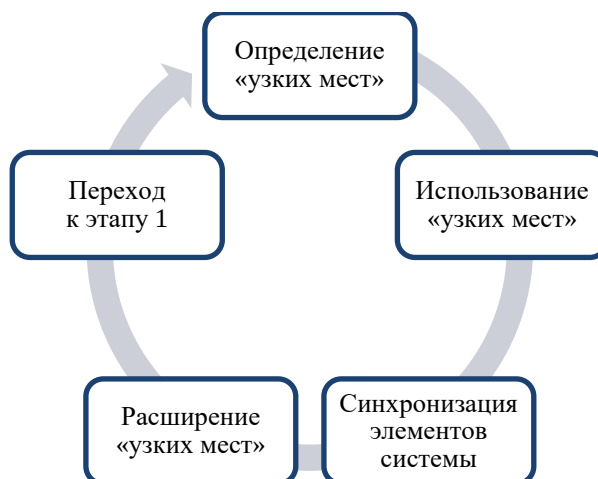


Рис. 4. Этапы работы с «узкими местами» в теории ограничений (составлено авторами)

При выявлении фундаментальной базы для анализа «узких мест» прежде всего необходимо определить факторы, обеспечивающие существование системы, к которым могут быть отнесены следующие:

- 1) идентификация цели инновационной деятельности;
- 2) определение ключевых факторов успеха инновационной деятельности;
- 3) выработка критериев оценки уровня достижения цели инновационной деятельности;
- 4) идентификация неблагоприятных факторов и системных ограничений, затрудняющих достижение поставленной цели.

В исследовании А. А. Владыкина инновации научно-производственного предприятия рассматриваются как необходимое условие для достижения целей организации, связанных с повышением рентабельности деятельности, конкурентоспособности бизнеса. В данном случае интересной представляется точка зрения автора, при которой инновации рассматриваются не как цель, а как инструмент для достижения данной цели [13].

Отметим, что системные ограничения следует анализировать с двух аспектов:

- 1) имеющие внутренний характер и присущие исключительно данной системе;
- 2) имеющие внешние причины возникновения и определяемые макро-условиями функционирования системы.

Обобщая исследования по проблематике теории ограничений, приведем примеры типов ограничений инновационной деятельности научно-производственных предприятий (табл. 1).

Таблица 1

**Классификация ограничений («узких мест») инновационной деятельности
научно-производственных предприятий (составлено авторами)**

Тип ограничения	Содержание ограничения
Внешние	
Рыночные	Недостаток спроса на инновационную продукцию; высокие рыночные риски; неразвитость внутреннего рынка потребления инновационной продукции
Институциональные	Несовершенство нормативно-правовой базы регулирования инновационной деятельности, несогласованность инновационной и научно-технической политики национального уровня управления и отраслевых программ; недостаток уровня государственной поддержки; низкий уровень развития кооперационных связей
Логистические	Длительный логистический цикл поставки сырья и комплектующих; несогласованность действий участников цепи поставок инновационной продукции
Внутренние	
Ресурсные (материальные)	Недостаток инвестиций; устаревшая материальная база производства; высокий уровень износа производственных фондов и лабораторной базы
Ресурсные (нематериальные)	Недостаток знаний, квалификации, компетенций персонала; низкий уровень патентной защиты инновационной деятельности; низкий уровень коммерциализации результатов НИОКР
Организационно-управленческие	Низкая гибкость организационной структуры управления, высокая властная дистанция; низкое стремление избегать неопределенности; низкий уровень динамизма

Таким образом, теорию ограничений следует рассматривать как набор управленческих решений в сфере проектного и процессного управления инновационной деятельностью научно-производственного предприятия, позволяющих генерировать новые стратегические решения, отличающиеся большей эффективностью процесса управления, способствующие повышению конкурентоспособности предприятия и уровня его инновационной активности.

Заключение

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Во-первых, на научно-производственных предприятиях инновации рассматриваются не как цель, а как способ или инструмент для достижения цели, связанный с повышением конкурентоспособности научно-технологической сферы российской экономики. Во-вторых, преодоление ограничений инновационного развития научно-производственного предприятия следует рассматривать на основе интеграции теории кластерного, технологического развития, предпринимательской теории фирмы, теории ограничений и организации промышленности. В-третьих, несмотря на рост объема выполненных научно-исследовательских работ в расчете на одно промышленное предприятие, количество данных работ на одного сотрудника в сопоставимой динамике уменьшалось, что ставит на повестку дня вопрос управления

человеческим капиталом научно-производственных предприятий и подразделений, актуализируя специфику кадрового и научного потенциала данных организаций. Полагаем, что результаты проведенного исследования могут быть использованы в дальнейших работах по совершенствованию методов, механизмов и инструментов преодоления ограничений, сопровождающих работу научно-производственных предприятий, для повышения их ресурсной эффективности и конкурентоспособности.

Список литературы

1. Голдратт Э. М. Цель 2: дело не в везении. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2011. 277 с.
2. Голдратт Э. М., Голдратт-Ашлаг Э. Выбор: правила Голдратта. Минск : Попурри, 2017. 208 с.
3. Голдратт Э. М., Кокс Дж. Цель: процесс непрерывного улучшения. Минск : Попурри, 2012. 400 с.
4. Кимельман С. Интегрированная ресурсно-перерабатывающая модель // Экономист. 2012. № 1. С. 11–23.
5. Портер М. Международная конкуренция. М. : Международные отношения, 1993. 256 с.
6. Шумпетер Й. А. Теория экономического развития. М. : Эксмо, 2007. 864 с.
7. Тироль Ж. Рынки и рыночная власть: теория организации промышленности : пер. с англ. СПб. : Экономическая школа, 1996. 745 с.
8. Роббинс Л. Предмет экономической науки // THESIS. 1993. Т. 1, вып. 1. С. 18–28.
9. Артяков В. В., Чурсин А. А., Русинов А. А. Моделирование устойчивости управления проектами предприятий наукоемких отраслей промышленности // Бизнес в законе. 2014. № 6. С. 121–124.
10. Родионова И. А., Семенов А. С. Теория ограничений как инновационный инструмент управленческого планирования на предприятиях наукоемких отраслей // Computational nanotechnology. 2015. № 1. С. 40–43.
11. Шинкевич А. И., Кудрявцева С. С., Барсегян Н. В. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов. Курск : Университетская книга, 2021. 102 с.
12. Кудрявцева С. С. Развитие национальных инновационных систем на принципах открытых инноваций // Экономический вестник Республики Татарстан. 2014. № 2. С. 41–46.
13. Владыкин А. А. Теория ограничений систем в реализации инновационных изменений на промышленных предприятиях // Науковедение. 2016. Т. 8, № 2. С. 1–11.

References

1. Goldratt E.M. *Tsel' 2: delo ne v vезenii = Goal 2: it's not about luck*. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2011:277. (In Russ.)
2. Goldratt E.M., Goldratt-Ashlag E. *Vybor: pravila Goldratta = Choice: Goldratt's rules*. Minsk: Popurri, 2017:208. (In Russ.)
3. Goldratt E.M., Koks Dzh. *Tsel': protsess nepreryvnogo uluchsheniya = Goal: a process of continuous improvement*. Minsk: Popurri, 2012:400. (In Russ.)
4. Kimel'man S. Integrated resource-processing model. *Ekonomist = Economist*. 2012;(1):11–23. (In Russ.)
5. Porter M. *Mezhdunarodnaya konkurenciya = International competition*. Moscow: Mezhdunarodnye otnosheniya, 1993:256. (In Russ.)
6. Shumpeter Y.A. *Teoriya ekonomicheskogo razvitiya = Theory of economic development*. Moscow: Eksmo, 2007:864. (In Russ.)

7. Tirol' Zh. *Rynki i rynochnaya vlast': teoriya organizatsii promyshlennosti: per. s angl. = Markets and market power: theory of industrial organization : trans. from English.* Saint Petersburg: Ekonomicheskaya shkola, 1996:745. (In Russ.)
8. Robbins L. Subject of economic science. *THESIS.* 1993;1(1):18–28. (In Russ.)
9. Artyakov V.V., Chursin A.A., Rusinov A.A. Modeling of sustainability of project management of enterprises of knowledge-intensive industries. *Biznes v zakone = Business in law.* 2014;(6):121–124. (In Russ.)
10. Rodionova I.A., Semenov A.S. Theory of constraints as an innovative tool of management planning at enterprises of high-tech industries. *Computational nanotechnology.* 2015;(1):40–43. (In Russ.)
11. Shinkevich A.I., Kudryavtseva S.S., Barsegyan N.V. *Modelirovanie i optimizatsiya organizatsionnykh struktur i proizvodstvennykh protsessov = Modeling and optimization of organizational structures and production processes.* Kursk: Universitetskaya kniga, 2021:102. (In Russ.)
12. Kudryavtseva S.S. Development of national innovation systems based on the principles of open innovation. *Ekonomicheskii vestnik Respubliki Tatarstan = Economic Bulletin of the Republic of Tatarstan.* 2014;(2):41–46. (In Russ.)
13. Vladykin A.A. Theory of system constraints in the implementation of innovative changes at industrial enterprises. *Naukovedenie = Naukovedenie.* 2016;8(2):1–11. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Иванович Шинкевич

доктор экономических наук,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой логистики
и управления,
Казанский национальный
исследовательский
технологический университет
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 68)
E-mail: ashinkevich@mail.ru

Aleksey I. Shinkevich

Doctor of economic sciences,
doctor of technical sciences,
professor, head of the sub-department
of logistics and management,
Kazan National Research
Technological University
(68 K. Marx street, Kazan, Russia)

Светлана Сергеевна Кудрявцева

доктор экономических наук,
доцент, профессор кафедры
логистики и управления,
Казанский национальный
исследовательский
технологический университет
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 68)
E-mail: sveta516@yandex.ru

Svetlana S. Kudryavtseva

Doctor of economical sciences,
associate professor, professor
of the sub-department
of logistics and management,
Kazan National Research
Technological University
(68 K. Marx street, Kazan, Russia)

Дмитрий Викторович Харитонов

доктор технических наук,
заместитель директора научно-
производственного комплекса
по производственной деятельности –
начальник цеха,
Обнинское научно-производственное
предприятие «Технология»
имени А. Г. Ромашина
(Россия, г. Обнинск, Киевское шоссе, 15)
E-mail: Haritonov.d1978@yandex.ru

Dmitry V. Kharitonov

Doctor of technical sciences, deputy
director of the scientific and production
complex for production activities –
head of the workshop,
Obninsk Scientific and Production
Enterprise "Technology"
named after A.G. Romashin
(15 Kievskoe highway, Obninsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 29.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.06.2023

Принята к публикации/Accepted 20.06.2023

Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

УДК 004.891.3

doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-6

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

А. Е. Павликов¹, М. Г. Городничев²

^{1, 2} Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

¹ a.e.pavlikov@mtuci.ru, ² m.g.gorodnichev@mtuci.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Оценка определения положения тела человека – важная задача компьютерного зрения, которая включает в себя прогнозирование 3D и 2D-координат, местоположения суставов человеческого тела на основе изображения и видео. *Материалы и методы.* Используются наборы данных COCO, MPII Human Pose и Human3.6M, метрики MPJPE, mAP и PCK для оценки результатов, а также глубокие нейронные сети для обучения моделей. *Результаты.* Представлено сравнение результатов обучения моделей на нескольких наборах данных, включая COCO, MPII Human Pose и Human3.6M, на основе метрик MPJPE, mAP и PCK. Кроме того, обсуждаются преимущества и недостатки различных методов и моделей, а также их применимость к различным задачам. *Выводы.* Современные методы, основанные на глубоких нейронных сетях, демонстрируют высокую точность и эффективность при решении задачи оценки положения тела. Однако такие модели требуют больших вычислительных ресурсов и времени для обучения. Выбор конкретной модели и метода зависит от требований конкретной задачи и доступных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: определение положения человеческого тела, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети, восходящий подход, нисходящий подход, наборы данных, оценочные метрики, задачи

Для цитирования: Павликов А. Е., Городничев М. Г. Обзор технологий определения положения тела человека // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 81–97. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-6

OVERVIEW OF TECHNOLOGIES FOR DETERMINING THE POSITION OF THE HUMAN BODY

A.E. Pavlikov¹, M.G. Gorodnichev²

^{1,2} Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

¹ a.e.pavlikov@mtuci.ru, ² m.g.gorodnichev@mtuci.ru

Abstract. *Background.* The assessment of the position of the human body is an important task of computer vision, which includes the prediction of 3D and 2D coordinates, the location of the joints of the human body based on images and videos. *Materials and methods.* COCO, MPII Human Pose and Human3.6M datasets, MPJPE, mAP and PCK metrics for evaluating results, as well as deep neural networks for training models were used. *Results.* The article presents a comparison of the training results of models on several datasets, including COCO, MPII Human Pose and Human3.6M, based on MPJPE, mAP and PCK metrics. In addition, the advantages and disadvantages of various methods and models, as well as their applicability to various problems, are discussed. *Conclusions.* Modern methods based on deep neural networks demonstrate high accuracy and efficiency in solving the problem of estimating body position. However, such models require large computational resources and training time. The choice of a specific model and method depends on the requirements of a particular task and the available computing resources.

Keywords: human pose estimation, deep learning, convolutional neural networks, recurrent neural networks, bottom-up approach, top-down approach, datasets, evaluation metrics, challenges

For citation: Pavlikov A.E., Gorodnichev M.G. Overview of technologies for determining the position of the human body. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):81–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-6

Введение

В последние годы все больше внимания уделяется развитию технологий, позволяющих оценивать положение тела человека с высокой точностью. Основная задача алгоритмов оценки положения тела заключается в определении положения и ориентации человеческого тела в пространстве. Кроме того, такие алгоритмы могут использоваться для определения положения тела отдельных частей тела, например головы, рук, ног и т.д. Эта задача имеет множество практических применений, таких как повышение качества тренировок в спорте, определение девиантного поведения, улучшение эргономики рабочих мест, оценка риска травм в медицине и т.д.

Методы проектирования сетевой архитектуры направлены на создание эффективных и мощных моделей глубокого обучения, которые могут решать сложные задачи в различных областях, таких как обработка изображений, обработка естественного языка, распознавание речи, рекомендательные системы и др. [1]. Существуют три основных метода построения моделей оценки положения тела человека – это восходящий, нисходящий и многоэтапный методы.

Восходящие методы оценки положения человеческого тела на первом этапе обнаруживают отдельные суставы на изображении с использованием таких методов, как детекторы ключевых точек [2] или выделение характерных точек [3]. Затем суставы группируются в части тела, и, наконец, используется модель для прогнозирования положения тела на основе положения его частей. Хотя эти методы способны работать с окклюзиями и изображениями с несколькими людьми, они могут требовать больших вычислительных ресурсов [4].

Напротив, нисходящие методы сначала идентифицируют человека на изображении, а затем определяют его положение [5]. Подходы к обнаружению объектов обычно используются для распознавания человека, затем отдельная модель предсказывает его положение. Несмотря на то, что методы «сверху вниз» позволяют точно локализовать человека на изображении, они могут столкнуться с трудностями в местах с большим скоплением людей или с окклюзиями [6, 7].

Многоэтапные методы оценки положения человеческого тела используют как восходящий, так и нисходящий подходы для повышения точности. Первоначально все суставы на изображении обнаруживаются восходящим методом, а затем группируются в отдельные части тела и аппроксимируются нисходящим методом [8, 9]. Многоэтапные методы продемонстрировали эффективность в управлении окклюзиями, многолюдными сценами, а также вариациями положения и внешности человека [10]. Однако они могут потребовать больших вычислительных ресурсов и более сложных моделей по сравнению с двумя другими методами.

Методы определения положения тела человека

Один из первых методов, использующих нисходящий подход, это метод итерационного наименьшего квадрата (Iterative Least Squares, ILS). Он основан на геометрической модели скелета, которая представляет собой набор соединенных между собой костей. ILS использует данные о движении человека и ориентацию камеры для нахождения оптимального положения, которое наиболее точно соответствует данным [11]. Обозначим через X матрицу размера $(n, 2m)$, где каждая строка представляет координаты всех суставов на одном изображении, и через Y матрицу размера $(n, 3m)$, где каждая строка представляет 3D-координаты всех суставов на соответствующем изображении. Метод ILS решает задачу путем минимизации среднеквадратичной ошибки между предсказанными и истинными 3D-координатами суставов на всех изображениях. Формально определим функцию потерь L как среднеквадратичную ошибку между Y и XW :

$$L(W) = \frac{1}{2n} \|XW - Y\|_F^2, \quad (1)$$

где $\|XW - Y\|_F^2$ обозначает норму Фробениуса. Задача состоит в том, чтобы найти матрицу W , которая минимизирует функцию потерь $L(W)$. На каждой итерации решается линейная система уравнений

$$(X^T X + \lambda I)W = X^T Y, \quad (2)$$

где λ – регуляризационный параметр, который используется для предотвращения переобучения. Итерации продолжаются до тех пор, пока значение функции потерь не сойдется к определенной точности. Полученная на последней итерации матрица W используется для оценки 3D-координат суставов на новых изображениях. Первый минус ILS заключается в том, что он требует достаточно много вычислительных ресурсов для работы. Это особенно важно для больших наборов данных с большим количеством суставов. Второй минус

связан с тем, что ILS может приводить к переобучению модели, если модель слишком сильно подстраивается под обучающие данные, то она может работать плохо на новых данных, что снижает ее точность. Данный подход применялся во многих исследованиях, например в [12] используется итеративный метод наименьших квадратов для оценки 3D-позы человека из одиночных глубинных изображений. В [13] описывается метод, который использует итеративный метод наименьших квадратов для оценки позы нескольких людей на изображении, а в [14] применяется итеративный метод наименьших квадратов с использованием признаков глубоких нейронных сетей для оценки позы человека на изображении.

ResNet (Residual Neural Network) – архитектура сверточной нейронной сети для оценки положения тела человека. Принцип работы ResNet основывается на использовании резидуальных блоков, которые позволяют эффективнее передавать информацию между слоями сети. Резидуальный блок представляет собой последовательность сверточных слоев, вход которых складывается с выходом блока [15]. Пусть x является входным изображением размерности $h \times w \times c$, где h , w и c соответственно обозначают высоту, ширину и количество цветовых каналов изображения. Рассмотрим функцию $F(x)$, которая представляет собой последовательность сверточных слоев, примененных к изображению x . Тогда ResNet определяется как функция $H(x)$, которая является результатом применения функции $F(x)$ с добавлением резидуального блока:

$$H(x) = F(x) + x. \quad (3)$$

Добавление x к выходу $F(x)$ позволяет модели обучаться на более глубоких уровнях, упрощает процесс обучения и решает проблему затухающих градиентов. ResNet имеет ряд преимуществ, таких как высокая точность при решении задач компьютерного зрения, а также возможность использования глубоких нейронных сетей. Однако минусы ResNet заключаются в большом количестве параметров и вычислительной сложности, которые могут затруднить применение данной модели в ряде задач, а также потребность в большом количестве данных для обучения. ResNet применяли в ряде исследований, в [16] авторы использовали ResNet в качестве основной архитектуры для обработки изображений. ResNet была применена в [17], где авторы использовали ResNet для обучения нейронной сети на основе множества видов изображений человеческой позы. В [18] описывается метод, который использует архитектуру ResNet для оценки позы человека с объединением многомасштабных признаков. ResNet используется для оценки позы человека с использованием многопредставленной согласованности [19, 20].

OpenPose – это метод оценки положения тела человека на основе нейронных сетей, который использует совместный анализ всех объектов на изображении для повышения точности определения положения тела [21, 22]. Он использует двухэтапный процесс, состоящий из обнаружения объектов (детектирование) и определения положения тела (локализация ключевых точек). Первый этап метода заключается в обнаружении объектов с помощью глубокой сверточной сети, называемой OpenPoseNet. OpenPoseNet можно формализовать через сверточные слои и функцию активации [23–25]. Пусть x – это входное изображение размером $w \times h \times c$, где h , w – ширина и высота

изображения, а c – количество каналов изображения. Тогда первый сверточный слой в OpenPoseNet можно записать в следующей форме:

$$f_1(x) = \max(0, W_1 \cdot x + b_1), \quad (4)$$

где W_1 – ядро свертки первого слоя; b_1 – смещение; функция $\max(0, z)$ – функция активации ReLU. Аналогично, последующие сверточные слои могут быть записаны в следующей форме:

$$f_n(x) = \max(0, W_n \cdot f_{n-1}(x) + b_n), \quad (5)$$

где W_n – ядро свертки первого слоя; b_n – смещение; функция $\max(0, z)$ – функция активации ReLU. Наконец, выходной слой представляет собой полносвязный слой, который преобразует выходные данные сверточных слоев в соответствующие координаты объектов на изображении. На втором этапе для поиска связей между ключевыми точками на изображении используется метод Part Affinity Fields (PAF). Функция PAF может быть определена следующим образом:

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)], \quad (6)$$

где n – количество возможных пар ключевых точек на изображении; $F_i(x)$ – канал признаков, соответствующий связи между i -й и $i+1$ -й ключевыми точками.

Каждый канал признаков $F_i(x)$ представляет собой двумерный массив размером $w * h$, где каждый элемент является вероятностью того, что данный пиксель принадлежит связи между определенными ключевыми точками. В частности, каждый элемент $F_i(x)$ может быть записан в следующей форме:

$$F_i(x)_{p,q} = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^K w_k \cdot S(\Theta_k, p, q), \quad (7)$$

где p и q – координаты пикселя на изображении; K – количество точек, которые участвуют в связи; w_k – вес, присвоенный k -й точке; $S(\Theta_k, p, q)$ – вероятность, что данный пиксель принадлежит связи между k -й и $k+1$ -й ключевыми точками при заданном угле Θ_k ; Z – нормализующий коэффициент. В [26] описывается разработка метода Convolutional Pose Machines, который является усовершенствованной версией метода OpenPose. В работе авторы подробно описывают преимущества метода Convolutional Pose Machines перед OpenPose, включая более точную оценку положения тела, возможность обнаружения частей тела, не видимых на изображении, и улучшенную обработку видео. В [27] авторы описывают применение метода OpenPose для оценки положения тела нескольких людей на изображении в реальном времени. Они показывают, что OpenPose может обрабатывать изображения с несколькими людьми на них и достигать высокой точности оценки положения тела.

Среди преимуществ OpenPose можно отметить высокую точность оценки положения тела, возможность работы в реальном времени и способность обрабатывать изображения с несколькими людьми на них. Однако среди недостатков можно отметить высокие требования к вычислительным

ресурсам, что делает метод менее применимым для использования на мобильных устройствах и других ограниченных платформах.

DeepCut – это метод оценки положения тела человека, который основывается на детектировании соединительных суставов между ключевыми точками. Он представляет из себя графическую модель, в которой каждый узел соответствует ключевой точке, а ребра – соединительным суставам между этими точками [28, 29]. Модель DeepCut для оценки положения тела формально задается следующей функцией ошибки:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K w_k(x_i, y_j) \cdot \delta y_j = k \cdot \|v_{ij} - p_{ik}(x)\|^2, \quad (8)$$

где x – это изображение; y – вектор, состоящий из m ключевых точек на изображении. Функция $E(x, y)$ представляет собой сумму квадратов разницы между предсказанными позициями ключевых точек $p_{ik}(x)$ и их реальными позициями v_{ij} , умноженных на весовой коэффициент $w_k(x_i, y_j)$. δ используется в контексте расчета ошибки между предсказанным положением сустава и его фактическим положением на изображении. Весовой коэффициент учитывает важность каждой точки на изображении и вычисляется как функция расстояния между ключевой точкой и пикселем изображения. Оптимальные значения параметров модели DeepCut находятся путем минимизации функции ошибки $E(x, y)$:

$$\min_{x, y} E(x, y). \quad (9)$$

При этом весовые коэффициенты $w_k(x_i, y_j)$ вычисляются на этапе предобработки данных. В [30] авторы применяют модель DeepCut для оценки положения тела на датасетах MPII и LSP. Они отмечают, что DeepCut демонстрирует высокую точность определения тела на этих наборах данных, но при этом требует больших вычислительных ресурсов и времени для обучения. В [31] авторы исследуют различные методы определения положения тела человека, включая DeepCut. Они отмечают, что DeepCut демонстрирует высокую точность определения положения, особенно на наборах данных с малым количеством объектов, но имеет слабые стороны, такие как высокая вычислительная сложность и ограниченная способность обрабатывать изображения с разным масштабом. В [32] описывается метод обучения модели DeepCut на больших наборах данных, который позволяет быстро и точно оценивать позы нескольких людей на изображениях. Авторы статьи предлагают новый метод обучения, который использует «пропуск через случайный лес» для быстрого и эффективного обучения модели на больших наборах данных. Этот метод обучения позволяет достичь высокой точности определения положения тела человека при использовании больших наборов данных, что делает модель DeepCut точной и эффективной в решении задач компьютерного зрения. В [33] описывается улучшенная версия модели DeepCut. Авторы статьи предлагают новую архитектуру нейронной сети, которая использует более глубокие сверточные слои и эффективные методы обучения для достижения более высокой точности и скорости работы модели.

Эти работы демонстрируют, что DeepCut является мощным методом определения положения тела человека, который обеспечивает высокую точность, но при этом требует больших вычислительных ресурсов и времени для обучения. Кроме того, ограничения модели, такие как ее способность работать с изображениями разных масштабов, могут ограничить ее применимость в некоторых задачах. Для сравнения выбранных моделей необходимо определить критерии. Четкие критерии помогают определить, насколько точно и надежно алгоритмы могут обнаруживать и определять положение тела человека на изображениях или видео. Кроме того, показатели оценки позволяют сравнивать различные методы определения положения тела и выбирать наиболее подходящий для конкретной задачи.

Точность и показатели методов определения положения человеческого тела

Оценка эффективности алгоритмов НРЕ необходима для определения качества работы алгоритмов, устранения ошибок и недочетов в моделях, выбора наиболее подходящего метода для конкретной задачи, а также для сравнения результатов различных моделей. Ниже перечислены некоторые из оценок.

Intersection Over Union (IoU) – это метрика, используемая для оценки производительности алгоритма обнаружения объектов. Значение IoU рассчитывается как отношение площади пересечения между предсказанными и аннотированными ограничивающими рамками к площади их объединения.

Процент правильных ключевых точек (РСК) – это показатель, используемый для оценки алгоритма НРЕ. Он измеряет точность расчетных местоположений суставов, вычисляя процент правильно предсказанных местоположений суставов по сравнению с реальными [34]. Формула РСК выглядит следующим образом:

$$E_{РСК} = \frac{m_i}{n_j}, \quad (10)$$

где m_i – количество ключевых точек, для которых расстояние между предсказанной и истинной позицией меньше порогового значения; n_j – общее количество ключевых точек на изображении.

РСК вычисляют, сначала определяя пороговое расстояние между предсказанными и аннотированными местоположениями соединений. Если расстояние между прогнозируемым соединением и соответствующим ему аннотированным соединением меньше порогового значения, такое предсказание считается правильным [35]. Затем вычисляется процент правильных прогнозов для всех суставов в наборе данных.

Средняя ошибка положения сустава (МРЈРЕ) – это показатель [36], используемый для оценки точности модели НРЕ. МРЈРЕ измеряет среднее расстояние между предсказанными местоположениями суставов и реальными местоположениями суставов, нормализованное по длине кости между соответствующими суставами:

$$E_{МРЈРЕ} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_j), \quad (11)$$

где N – общее количество суставов на изображении; d_j – расстояние между предсказанной позицией сустава и его истинной позицией.

Длина кости обычно определяется как расстояние между двумя соседними суставами. MPJPE обеспечивает меру средней ошибки по всем суставам тела. Это метрика применима для определения конкретных суставов, где модель может быть менее точной [37], поскольку она может не отражать общее качество модели, так как фокусируется на местах соединения, а не на общей конфигурации позы.

Средняя точность (mAP) – это широко используемый показатель для оценки производительности моделей обнаружения объектов и семантической сегментации, в том числе используемых для оценки позы человека [38]:

$$E_{mAP} = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N (AP_i), \quad (12)$$

где N – количество классов объектов на изображении; AP_i – Average Precision для каждого класса i .

В табл. 1, 2 представлено сравнение основных методов определения положения тела человека для набора данных Human 3.6M и MPII Human Pose. Модели были обучены на одинаковом количестве эпох.

Таблица 1

Результаты обучения моделей на наборе данных Human 3.6

Метод	MPJPE	mAP	PCK
ResNet	40.1	0.76	0.84
OpenPose	33.4	0.86	0.92
DeepCut	45.3	0.70	0.80

Таблица 2

Результаты обучения моделей на наборе данных MPII Human Pose

Метод	MPJPE	mAP	PCK
ResNet	75.8	0.72	0.63
OpenPose	69.5	0.84	0.77
DeepCut	82.3	0.65	0.55

Из таблицы сравнения методов ResNet, OpenPose и DeepCut для набора данных Human3.6m видно, что метод OpenPose имеет наибольшую точность по всем трем метрикам. Метод ResNet также имеет довольно высокую точность, но уступает методу OpenPose. Метод DeepCut показал наименьшую точность по всем трем метрикам.

В таблице сравнения для набора данных MPII Human pose также видно, что метод OpenPose имеет наилучшую точность по всем метрикам, но здесь разрыв между методами не такой большой, как в случае с набором данных Human3.6m. Метод ResNet показал среднюю точность по сравнению с остальными методами, а метод DeepCut продемонстрировал наименьшую точность.

Таким образом, можно сделать вывод, что метод OpenPose является одним из наиболее точных методов положения тела человека, показывая высокие

результаты на различных наборах данных и метриках. Однако выбор метода зависит от конкретной задачи и требований приложения, поэтому необходимо выбирать метод, который лучше всего соответствует конкретным требованиям.

Данные для обучения моделей положения человеческого тела

Существует множество наборов данных, предназначенных для обучения и оценки моделей НРЕ. Эти наборы данных играют решающую роль в разработке модели, поскольку они предлагают стандартизированный эталон для сравнения эффективности различных алгоритмов. В исследовательских целях были выделены четыре набора данных – COCO, MP-II HumanPose, Human3.6M и LSP.

COCO (Common Objects in Context) – наиболее широко используемый набор 2D-данных о человеческом теле, который в основном используется для НРЕ с несколькими людьми в кадре. Этот набор данных содержит в себе более 330 тыс. изображений, помеченных 17 ключевыми точками по всему телу [39–42].

MP-II Human Pose является часто используемым стандартом для оценки алгоритмов НРЕ. Набор данных состоит из около 25 тыс. изображений людей, занимающихся разнообразными повседневными делами. Каждое изображение аннотировано положениями 16 суставов для каждого человека, включая голову, шею, плечи, локти, запястья, бедра, колени и лодыжки [43–46].

Human3.6M служит эталоном для оценки 3D НРЕ алгоритмов. Данный набор данных содержит более 3,6 млн изображений и аннотаций 3D-поз людей, выполняющих различные действия, такие как ходьба, бег трусцой или сидение. Набор данных был записан с использованием системы захвата движения, которая фиксирует положение и ориентацию маркеров на теле человека [47–49].

LSP (Leeds Sports Pose) является популярным эталоном для оценки алгоритмов определения 2D-положения тела человека. Он содержит около 2000 изображений людей, занимающихся спортом, таким как бег, прыжки и растяжка. Набор данных включает аннотации для 14 суставов для каждого человека, включая голову, шею, плечи, локти, запястья, бедра, колени и лодыжки [50].

Наборы данных COCO, MP-II Human Pose, Human3.6M и LSP широко используются для оценки алгоритмов НРЕ. Приведем ключевые различия между этими наборами данных.

Масштаб и сложность: набор данных COCO является самым большим из четырех наборов данных и содержит более 330 тыс. изображений и аннотаций для 17 ключевых точек человеческого тела. Наборы данных MP-II Human Pose и LSP меньше, примерно 25 тыс. и 2000 изображений соответственно, а также содержат аннотации для 16 и 14 местоположений ключевых точек. Набор данных Human3.6M содержит более 3,6 млн изображений и трехмерных положений человеческого тела, выполняющих различные действия, что делает его самым большим и сложным набором данных из четырех.

Тип аннотаций: наборы данных COCO, MP-II Human Pose и LSP включают аннотации для двумерных положений ключевых точек, а набор данных Human3.6M включает аннотации для трехмерных положений человеческого тела.

Сложные сценарии: наборы данных COCO и MPII Human Pose включают изображения с несколькими людьми, окклюзиями и различными условиями освещения. Набор данных LSP включает в себя изображения людей, занимающихся спортом. Набор данных Human3.6M включает изображения, снятые с 15 камер, что делает его сложным эталоном для оценки алгоритмов НРЕ.

Цель: набор данных COCO предназначен не для оценки позы человека, а скорее для обнаружения объектов и сегментации. Наборы данных MPII Human Pose, LSP и Human3.6M специально разработаны для оценки позы человека.

Таким образом, каждый из этих наборов данных имеет свои сильные стороны и ограничения, и выбор набора данных зависит от конкретной задачи и требований приложения, таких как потребность в крупномасштабных данных, аннотациях 2D или 3D-поз, сложных сценариях и фокусе на оценку позы человека или другие задачи компьютерного зрения (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение наборов данных

Наборы данных	COCO	MP II	Human3.6M	LSP
Классы	16	17	32	15
Формат данных	JSON	MatLAB	Binary	MatLAB
Объем (шт.)	330 000	25 000	3 600 000	2000
Разделение тест./вер.	+	+	–	+

Заключение

Определение положения человеческого тела – это одна из ключевых задач в области компьютерного зрения и машинного обучения. В обзорной статье были рассмотрены основные методы определения положения человеческого тела, включая нисходящие и многоэтапные подходы, а также приведены основные метрики оценки качества моделей, такие как MPJPE, mAP, PCK и др.

Были рассмотрены также основные наборы данных, используемые для обучения и оценки моделей НРЕ, такие как MPII Human Pose, Human3.6M, COCO и LSP. Каждый набор данных имеет свои особенности, и выбор подхода к определению положения человеческого тела зависит от конкретной задачи и требований приложения.

Были также рассмотрены некоторые конкретные модели, такие как ResNet, OpenPose и DeepCut, их принцип работы, а также преимущества и недостатки. Особое внимание было уделено модели OpenPose, которая на текущий момент является одним из самых точных методов определения положения тела и находит широкое применение в различных областях. В целом определение положения человеческого тела – это сложная задача, которая требует глубоких знаний в области компьютерного зрения и машинного обучения. Однако благодаря появлению новых методов и технологий мы можем ожидать дальнейшего улучшения точности и эффективности алгоритмов определения человеческого тела.

Список литературы

1. Andriluka M., Pishchulin L., Gehler P., Schiele B. 2d human pose estimation: New benchmark and state of the art analysis // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2014. June.
2. Zhang X., Zhou F., Lin Y. [et al.]. A Hierarchical Deep Learning Architecture for Human Pose Estimation // Computer Vision and Image Understanding. 2017. Vol. 161. P. 1–10. doi: 10.1016/j.cviu.2017.05.011
3. Almeida T., Silva J., Oliveira L. [et al.]. Real-time Human Pose Estimation using Deep Learning in Video Streams for Smart Environments // Sensors. 2019. Vol. 19 (7). P. 1576. doi: 10.3390/s19071576
4. Sun Y., Wang L., Yang Y. [et al.]. A Multi-View Deep Learning Approach for Human Pose Estimation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. Vol. 40 (7). P. 1627–1635. doi: 10.1109/TPAMI.2017.2747980
5. Felzenszwalb P., Girshick R., McAllester D., Ramanan D. Articulated Human Detection with Flexible Mixtures of Parts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010. Vol. 32 (10). P. 1972–1981. doi: 10.1109/TPAMI.2009.161
6. Belagiannis V., Zisserman A. Human Pose Estimation using Deep Consensus Voting // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. P. 7291–7299. doi: 10.1109/CVPR.2017.773
7. Shotton J., Fitzgibbon A., Cook M. [et al.]. Efficient Human Pose Estimation from Single Depth Images // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2013. P. 244–251. doi: 10.1109/CVPR.2013.37
8. Nie X., Liang X., Chen Y. [et al.]. Multi-Stage Human Pose Estimation with Spatial Context // European Conference on Computer Vision. 2018. P. 3–19. doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_1
9. Wei S., Ramakrishna V., Kanade T., Sheikh Y. Multi-Stage Human Pose Estimation via Part Detection and Association // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. Vol. 39 (7). P. 1346–1359. doi: 10.1109/TPAMI.2016.2603409
10. Sun K., Xiao B., Liu D. [et al.]. Multi-Stage Human Pose Estimation with Pose Refinement // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 7103–7112. doi: 10.1109/CVPR.2018.00745
11. Ye Y., Rehg J. M. Temporally coherent 3D tracking of human body using structured light // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2010. P. 1–8. doi: 10.1109/CVPR.2010.5540143
12. Tekin B., Rozantsev A., Lepetit V., Fua P. Iterative Least Squares for 3D Human Pose Estimation from Single Depth Images // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2016. Vol. 38 (9). P. 1813–1820. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2509999
13. Chen C., Wang Y., Wang Z. [et al.]. Iterative Least-Squares Optimization for Multiple Human Pose Estimation // IEEE Transactions on Image Processing. 2018. Vol. 27 (8). P. 3941–3954. doi: 10.1109/TIP.2018.2838740
14. Zhang X., Liang X., Liu S. [et al.]. Iterative Least-Squares Pose Estimation with Deep Neural Network Features // IEEE Transactions on Image Processing. 2019. Vol. 28 (1). P. 289–299. doi: 10.1109/TIP.2018.2868741
15. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. doi: 10.1109/CVPR.2016.90
16. Newell A., Yang K., Deng J. Stacked Hourglass Networks for Human Pose Estimation // European Conference on Computer Vision. 2016. doi: 10.1007/978-3-319-46475-6_5
17. Sun X., Zhang S., Xue Y., Zhang H. Learning Pose Specific Representations by Predicting Different Views // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. doi: 10.1109/TPAMI.2017.2778404

18. Zhang Y., Li Y., Zhang Y. [et al.]. ResNet-Based Human Pose Estimation with Multi-Scale Feature Fusion // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 201684–201693. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031665
19. Li Y., Zhang Y., Zhang Y. [et al.]. ResNet-Based Human Pose Estimation with Multi-View Consistency // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2021. Vol. 30. doi: 10.1109/TIP.2021.3051745
20. Zhang Y., Li Y., Zhang Y. [et al.]. ResNet-Based Human Pose Estimation with Self-Attention and Spatial Transformer Network // *IEEE Transactions on Multimedia*. 2021. Vol. 23. doi: 10.1109/TMM.2021.3072389
21. Yang W., Li S., Ouyang W., Wang H. Learning feature pyramids for human pose estimation // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. P. 931–940.
22. Girdhar R., Fouhey D. F. Detect-and-select: Efficient object detection in videos using keypoint proposals // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. 2018. P. 20–36.
23. Kendall A., Grimes M., Cipolla R. PoseNet: A convolutional network for real-time 6-DOF camera relocalization // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2015. P. 2938–2946.
24. Kendall A., Cipolla R. Geometric loss functions for camera pose regression with deep learning // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 2492–2500.
25. Walch F., Hazirbas C., Leal-Taixé L. [et al.]. Image-based localization using LSTMs for structured feature correlation // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 6289–6298.
26. Wei S.-E., Ramakrishna V., Kanade T., Sheikh Y. Convolutional pose machines // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016. P. 4724–4732.
27. Cao Z., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 1302–1310.
28. Insaftudinov E., Pishchulin L., Andres B. [et al.]. Articulated multi-person tracking in the wild // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 6457–6465.
29. Pishchulin L., Insaftudinov E., Schiele B. DeepCut: Fast training of deep neural networks using large datasets // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2017. P. 1–9.
30. Yang W., Izadi Sh., Shotton J. Articulated Human Pose Estimation Using Deep Hierarchical Networks // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2014. P. 729–736. doi: 10.1109/CVPR.2014.98
31. Chu X., Yang W., Ouyang W. [et al.]. Deep Learning for Human Pose Estimation: A Survey // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020. Vol. 42, № 8. P. 1863–1895. doi: 10.1109/TPAMI.2019.2919907
32. Pishchulin L., Insaftudinov E., Schiele B. DeepCut: Fast training of deep neural networks using large datasets // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2017. P. 1–9.
33. Insaftudinov E., Pishchulin L., Andres B. [et al.]. DeeperCut: A deeper, stronger, and faster multi-person pose estimation model // *European Conference on Computer Vision*. 2016. P. 34–50.
34. Pishchulin L., Insaftudinov E., Tang S. [et al.]. Poselet conditioned pictorial structures // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2013. P. 588–595. doi: 10.1109/CVPR.2013.82

35. Pishchulin L., Insafutdinov E., Tang S. [et al.]. DeepCut: Joint Subset Partition and Labeling for Multi Person Pose Estimation // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. P. 4929–4937.
36. Toshev A., Szegedy C. Deeppose: Human pose estimation via deep neural networks // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2014. P. 1653–1660. doi: 10.1109/CVPR.2014.213
37. Carreira J., Zisserman A. Human pose estimation with iterative error feedback // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 4733–4742. doi: 10.1109/CVPR.2016.515
38. Wei S. E., Ramakrishna V. Convolutional pose machines // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 4724–4732. doi: 10.1109/CVPR.2016.511
39. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // Proceedings of the Neural Information Processing Systems (NIPS). 2015. P. 91–99. doi: 10.1007/s11263-015-0816-x
40. Lin T. Y., Maire M., Belongie S. [et al.]. Microsoft COCO: Common objects in context // European conference on computer vision. Springer, Cham., 2014. P. 740–755.
41. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 779–788.
42. Chen T., Li M., Li Y. [et al.]. Microsoft COCO: Common Objects in Context // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2014. P. 740–755. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/microsoft-coco-common-objects-in-context/> (дата обращения: 15.03.2023).
43. Carreira J., Zisserman A. Human pose estimation with iterative error feedback // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 4733–4742.
44. Sun K., Xiao B., Liu D., Wang J. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2019. P. 5693–5703.
45. Newell A., Yang K., Deng J. Stacked hourglass networks for human pose estimation // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2016. P. 483–499. doi: 10.1007/978-3-319-46487-9_28
46. Chen Y., Wang Z., Peng Y. [et al.]. Cascaded pyramid network for multi-person pose estimation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018. P. 7103–7112.
47. Ionescu C., Papava D., Olaru V., Sminchisescu C. Human3.6m: Large scale datasets and predictive methods for 3D human sensing in natural environments // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2014. Vol. 36 (7). P. 1325–1339.
48. Theobalt C., Hasler N., Stoll C., Rosenhahn B. Human3.6M: Large Scale Datasets and Predictive Methods for 3D Human Sensing in Natural Environments // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010. P. 1065–1080. doi: 10.1109/TPAMI.2009.155
49. Tekin B., Rozantsev A., Lepetit V., Fua P. Direct prediction of 3D body poses from motion compensated sequences // In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018. P. 991–1000.
50. Johnson S., Everingham M. Clustered pose and nonlinear appearance models for human pose estimation // Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC). 2010. doi: 10.5244/C.24.37

References

1. Andriluka M., Pishchulin L., Gehler P., Schiele B. 2d human pose estimation: New benchmark and state of the art analysis. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2014;June.
2. Zhang X., Zhou F., Lin Y. et al. A Hierarchical Deep Learning Architecture for Human Pose Estimation. *Computer Vision and Image Understanding*. 2017;161:1–10. doi: 10.1016/j.cviu.2017.05.011
3. Almeida T., Silva J., Oliveira L. et al. Real-time Human Pose Estimation using Deep Learning in Video Streams for Smart Environments. *Sensors*. 2019;19(7):1576. doi: 10.3390/s19071576
4. Sun Y., Wang L., Yang Y. et al. A Multi-View Deep Learning Approach for Human Pose Estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018;40(7):1627–1635. doi: 10.1109/TPAMI.2017.2747980
5. Felzenszwalb P., Girshick R., McAllester D., Ramanan D. Articulated Human Detection with Flexible Mixtures of Parts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2010;32(10):1972–1981. doi: 10.1109/TPAMI.2009.161
6. Belagiannis V., Zisserman A. Human Pose Estimation using Deep Consensus Voting. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017:7291–7299. doi: 10.1109/CVPR.2017.773
7. Shotton J., Fitzgibbon A., Cook M. et al. Efficient Human Pose Estimation from Single Depth Images. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013:244–251. doi: 10.1109/CVPR.2013.37
8. Nie X., Liang X., Chen Y. et al. Multi-Stage Human Pose Estimation with Spatial Context. *European Conference on Computer Vision*. 2018:3–19. doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_1
9. Wei S., Ramakrishna V., Kanade T., Sheikh Y. Multi-Stage Human Pose Estimation via Part Detection and Association. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017;39(7):1346–1359. doi: 10.1109/TPAMI.2016.2603409
10. Sun K., Xiao B., Liu D. et al. Multi-Stage Human Pose Estimation with Pose Refinement. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018:7103–7112. doi: 10.1109/CVPR.2018.00745
11. Ye Y., Rehg J.M. Temporally coherent 3D tracking of human body using structured light. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2010:1–8. doi: 10.1109/CVPR.2010.5540143
12. Tekin B., Rozantsev A., Lepetit V., Fua P. Iterative Least Squares for 3D Human Pose Estimation from Single Depth Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2016;38(9):1813–1820. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2509999
13. Chen C., Wang Y., Wang Z. et al. Iterative Least-Squares Optimization for Multiple Human Pose Estimation. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2018;27(8):3941–3954. doi: 10.1109/TIP.2018.2838740
14. Zhang X., Liang X., Liu S. et al. Iterative Least-Squares Pose Estimation with Deep Neural Network Features. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019;28(1):289–299. doi: 10.1109/TIP.2018.2868741
15. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016. doi: 10.1109/CVPR.2016.90
16. Newell A., Yang K., Deng J. Stacked Hourglass Networks for Human Pose Estimation. *European Conference on Computer Vision*. 2016. doi: 10.1007/978-3-319-46475-6_5
17. Sun X., Zhang S., Xue Y., Zhang H. Learning Pose Specific Representations by Predicting Different Views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018. doi: 10.1109/TPAMI.2017.2778404

18. Zhang Y., Li Y., Zhang Y. et al. ResNet-Based Human Pose Estimation with Multi-Scale Feature Fusion. *IEEE Access*. 2020;8:201684–201693. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031665
19. Li Y., Zhang Y., Zhang Y. et al. ResNet-Based Human Pose Estimation with Multi-View Consistency. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2021;30. doi: 10.1109/TIP.2021.3051745
20. Zhang Y., Li Y., Zhang Y. et al. ResNet-Based Human Pose Estimation with Self-Attention and Spatial Transformer Network. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2021;23. doi: 10.1109/TMM.2021.3072389
21. Yang W., Li S., Ouyang W., Wang H. Learning feature pyramids for human pose estimation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018:931–940.
22. Girdhar R., Fouhey D.F. Detect-and-select: Efficient object detection in videos using keypoint proposals. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. 2018:20–36.
23. Kendall A., Grimes M., Cipolla R. PoseNet: A convolutional network for real-time 6-DOF camera relocalization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2015:2938–2946.
24. Kendall A., Cipolla R. Geometric loss functions for camera pose regression with deep learning. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017:2492–2500.
25. Walch F., Hazirbas C., Leal-Taixé L. et al. Image-based localization using LSTMs for structured feature correlation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017:6289–6298.
26. Wei S.-E., Ramakrishna V., Kanade T., Sheikh Y. Convolutional pose machines. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016:4724–4732.
27. Cao Z., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y. Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017:1302–1310.
28. Insafutdinov E., Pishchulin L., Andres B. et al. Articulated multi-person tracking in the wild. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017:6457–6465.
29. Pishchulin L., Insafutdinov E., Schiele B. DeepCut: Fast training of deep neural networks using large datasets. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2017:1–9.
30. Yang W., Izadi Sh., Shotton J. Articulated Human Pose Estimation Using Deep Hierarchical Networks. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2014:729–736. doi: 10.1109/CVPR.2014.98
31. Chu X., Yang W., Ouyang W. et al. Deep Learning for Human Pose Estimation: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020;42(8):1863–1895. doi: 10.1109/TPAMI.2019.2919907
32. Pishchulin L., Insafutdinov E., Schiele B. DeepCut: Fast training of deep neural networks using large datasets. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2017:1–9.
33. Insafutdinov E., Pishchulin L., Andres B. et al. DeeperCut: A deeper, stronger, and faster multi-person pose estimation model. *European Conference on Computer Vision*. 2016:34–50.
34. Pishchulin L., Insafutdinov E., Tang S. et al. Poselet conditioned pictorial structures. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2013:588–595. doi: 10.1109/CVPR.2013.82

35. Pishchulin L., Insafutdinov E., Tang S. et al. DeepCut: Joint Subset Partition and Labeling for Multi Person Pose Estimation. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015:4929–4937.
36. Toshev A., Szegedy C. Deeppose: Human pose estimation via deep neural networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2014:1653–1660. doi: 10.1109/CVPR.2014.213
37. Carreira J., Zisserman A. Human pose estimation with iterative error feedback. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016:4733–4742. doi: 10.1109/CVPR.2016.515
38. Wei S.E., Ramakrishna V. Convolutional pose machines. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016:4724–4732. doi: 10.1109/CVPR.2016.511
39. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Proceedings of the Neural Information Processing Systems (NIPS)*. 2015:91–99. doi: 10.1007/s11263-015-0816-x
40. Lin T.Y., Maire M., Belongie S. et al. Microsoft COCO: Common objects in context. *European conference on computer vision*. Springer, Cham., 2014:740–755.
41. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016:779–788.
42. Chen T., Li M., Li Y. et al. Microsoft COCO: Common Objects in Context. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2014:740–755. Available at: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/microsoft-coco-common-objects-in-context/> (accessed 15.03.2023).
43. Carreira J., Zisserman A. Human pose estimation with iterative error feedback. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016:4733–4742.
44. Sun K., Xiao B., Liu D., Wang J. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2019:5693–5703.
45. Newell A., Yang K., Deng J. Stacked hourglass networks for human pose estimation. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2016:483–499. doi: 10.1007/978-3-319-46487-9_28
46. Chen Y., Wang Z., Peng Y. et al. Cascaded pyramid network for multi-person pose estimation. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018:7103–7112.
47. Ionescu C., Papava D., Olaru V., Sminchisescu C. Human3.6m: Large scale datasets and predictive methods for 3D human sensing in natural environments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2014;36(7):1325–1339.
48. Theobalt C., Hasler N., Stoll C., Rosenhahn B. Human3.6M: Large Scale Datasets and Predictive Methods for 3D Human Sensing in Natural Environments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2010:1065–1080. doi: 10.1109/TPAMI.2009.155
49. Tekin B., Rozantsev A., Lepetit V., Fua P. Direct prediction of 3D body poses from motion compensated sequences. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018:991–1000.
50. Johnson S., Everingham M. Clustered pose and nonlinear appearance models for human pose estimation. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*. 2010. doi: 10.5244/C.24.37

Информация об авторах / Information about the authors

Артём Евгеньевич Павликов

ассистент кафедры математической
кибернетики и информационных
технологий,
Московский технический университет
связи и информатики
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8)
E-mail: a.e.pavlikov@mtuci.ru

Artem E. Pavlikov

Assistant of the sub-department
of mathematical cybernetics
and information technologies,
Moscow Technical University
of Communications and Informatics
(8 Aviamotornaya street, Moscow, Russia)

Михаил Геннадьевич Городничев

кандидат технических наук, доцент,
декан факультета информационных
технологий,
Московский технический университет
связи и информатики
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8)
E-mail: m.g.gorodnichev@mtuci.ru

Mikhail G. Gorodnichev

Candidate of technical sciences, associate
professor, dean of the faculty
of information technology,
Moscow Technical University
of Communications and Informatics
(8 Aviamotornaya street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 10.04.2023

Поступила после рецензирования/Revised 24.05.2023

Принята к публикации/Accepted 04.07.2023

РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОВОГО УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ В СОСТОЯНИИ МНОГОПОТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. В. Зыков¹, С. А. Золотухин², М. А. Золотухина³

^{1, 2, 3} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹ Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики», Москва, Россия

¹ szykov@hse.ru, ² svt.science.lab@gmail.com, ³ rtu_mary@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сейчас внимание направлено на снижение числа аварий на участке Алтуфьевского шоссе, который имеет пять перекрестков. Такие инциденты становятся усугубляющими обстоятельствами для близлежащих объектов инфраструктуры, таких как торговые центры, магазины, кафе, также на оживленном участке есть станции метро. Нескончаемый поток людей и машин, остановки общественного транспорта и т.д. требуют новых условий безопасности. *Материалы и методы.* Использовались методы моделирования, статистики и интеллектуального анализа данных. Был смоделирован автомобильный поток на отдельно взятом участке дороги, определена проблема на перекрестке и применена методика имитационного моделирования для разработки алгоритма повышения качества дорожного движения, формирования новых условий безопасности и улучшения характеристик определения параметров неблагоприятных событий. *Результаты.* Разработана модель многопоточного движения транспорта в программной среде, проведен анализ автомобильного потока для усовершенствования используемого метода и определения новых условий безопасного движения на многопоточных участках дорог и перекрестках. Представлена модель принятия решений, которая была создана на основе обучающей выборки, полученной из видеопотока и содержащей определенные характеристики. *Выводы.* Наличие светофоров является одним из условий безопасности, но имеет некоторые нюансы. Подробно изложены все стадии обнаружения неблагоприятных ситуаций и новых решений.

Ключевые слова: управление безопасностью, анализ данных, автомобильные аварии, имитационное моделирование, машинное обучение, нейронные сети

Благодарности: выражаем благодарность МИРЭА – Российскому технологическому университету за предоставленную возможность проводить исследования в области искусственных нейронных сетей, безопасности и программной инженерии.

Для цитирования: Зыков С. В., Золотухин С. А., Золотухина М. А. Разработка метода и определение нового условия безопасности движения в состоянии многопоточности на основе математического моделирования // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 98–114. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-7

DEVELOPMENT OF A METHOD AND DEFINITION OF A NEW TRAFFIC SAFETY CONDITION IN A MULTITHREADING STATE BASED ON MATHEMATICAL MODELING

S.V. Zykov¹, S.A. Zolotukhin², M.A. Zolotukhina³

^{1, 2, 3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

¹ szykov@hse.ru, ² svt.science.lab@gmail.com, ³ rtu_mary@mail.ru

Abstract. *Background.* All attention is focused on reducing the number of accidents on an unfavorable section of the Altufyevsky highway in the area of 5 intersections. Such incidents become aggravating circumstances for nearby infrastructure facilities, such as: shopping malls, shops, cafes, there are also metro stations on a busy site. The endless flow of people and cars, public transport stops, etc. require new security conditions. *Materials and methods.* To carry out the analysis, methods of modeling, statistics and data mining were used, namely: to simulate the traffic flow on a particular road section, to determine the problem of the site, and to apply the simulation methodology to derive an algorithm for improving the quality of traffic, defining new safety conditions and improving the characteristics of determining the parameters of adverse events – these are the main aspects of the study. *Results.* A model of multithreaded traffic in a software environment has been developed, an analysis of the traffic flow has been carried out to improve the method used and to derive new conditions for safe traffic on multithreaded road sections and intersections. A decision-making model is derived by creating a training sample from the video stream of the characteristics presented in the article. *Conclusions.* The presence of traffic lights is one of the safety conditions, but it has some nuances. All stages of detection of adverse situations and new solutions are spelled out in the article.

Keywords: safety management, data analysis, car accidents, simulation modeling, machine learning, neural networks

Acknowledgments: we express our gratitude to the MIREA – Russian Technological University for the opportunity to conduct research in the field of artificial neural networks, security and software engineering.

For citation: Zykov S.V., Zolotukhin S.A., Zolotukhina M.A. Development of a method and definition of a new traffic safety condition in a multithreading state based on mathematical modeling. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):98–114. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-7

Введение

Автомобильные участки дорог являются опасными как для пешеходов, так и для машин. Особое внимание требуется перекресткам, регулируемым светофорами.

Службами города с постоянной периодичностью фиксируются автомобильные аварии с участием грузовых машин, легковых автомобилей, мотоциклов и т.д. Автодорога усложняется характеристиками аварий, водители теряются на пересечении дорог от большого количества полос или неожиданных ситуаций на дороге, когда один из водителей планирует успеть проскочить, а другой в это время начинает движение. Следовательно, необходимо рассмотреть автомагистрали и пересечения с большим количеством полос, обратить

внимание на неисправности в работе светофоров, интенсивность автомобильного потока и наличие пешеходных переходов (подземные не включены в перечень опасных). Такая стратегия поможет классифицировать условия безопасного движения всех участников пользования дорожным полотном. Следует рассмотреть главные причины и последствия аварийных ситуаций.

Постановка задачи

С использованием программной среды AnyLogic создадим автомагистраль с определенными качественными и количественными характеристиками, проведем анализ и выберем оптимальный алгоритм или условия для обеспечения безопасного передвижения транспортных средств. Для этого требуется подробно рассмотреть каждое событие и составить план устранения или уменьшения причин появления неблагоприятных событий, в том числе аварий.

Для проведения анализа потребуется:

1. Определить и исследовать опасные участки дорог, перекрестки, пешеходные переходы.
2. В программной среде разработать проблемный участок дороги с использованием геометрии и библиотек программного обеспечения. На выбранном участке выполняется поиск оптимальных параметров для исследования неблагоприятных событий.

Гипотеза 1. *Предположим, что значения фаз светофоров и расположения транспортного средства на перекрестке имеет зависимость от параметров, служащих увеличению степени аварийности дороги.*

Гипотеза 2. *Допустим, что вероятность столкновения между транспортными средствами на многопоточном перекрестке зависит от опасной зоны.*

Аналитический обзор

Аналитический обзор методов является важным инструментом для оценки состояния и перспектив развития безопасности дорожного движения. Проведение систематического обзора и анализа этих данных позволяет получить обширный обзор в выбранной области исследования, определить наиболее перспективные методы исследования, оценить качество и достоверность проведенных исследований, а также определить возможности их применения на практике.

Рассмотрим методы и подходы обнаружения опасных зон с помощью машинного обучения и нейронных сетей. Машинное обучение выполняет функцию построения алгоритма обучения с подкреплением в разрабатываемом методе, а нейронные сети применяются для идентификации и распознавания ситуационных параметров, т.е. опасных участков дороги. Прогноз строится на основе поставленных метрик в описываемых кадрах видеопотока, следовательно, модель обучается распознавать местность участков пересечения дорог, где присутствует опасная зона и ее параметры.

В настоящее время машинное обучение активно применяется в различных областях, таких как медицина, финансы, реклама, транспорт и многие другие. В данном обзоре мы рассмотрим наиболее перспективные методы

исследования в области машинного обучения, а также определим возможности их применения на практике.

В г. Туле был запущен мобильный комплекс для мониторинга состояния дорог с помощью нейронных сетей. Он включает в себя камеру видеонаблюдения и модуль искусственной нейросети. Это позволяет организовать мониторинг дорожного полотна и объектов инфраструктуры. По описательной характеристике разработки алгоритмы в модуле искусственной нейросети фиксируют неисправности, такие как ямы на дорогах, качество надписей на поверхности информационных указателей, мусор и т.д. Данный проект нацелен на исследование уровней загрязнения автотранспортных дорог и близлежащих объектов [1].

Применение нейросетей мобильными комплексами, оборудованными в автотранспортах г. Москвы, позволяет обнаруживать и отправлять городским службам информацию о состоянии дорог, территорий, степень загрязнения остановок и т.д. [2].

Разработан проект, направленный на идентификацию нарушений правил дорожного движения (ПДД) водителями, например пересечение сплошной линии и использующий искусственный интеллект [3]. Для распознавания изображений была применена сверточная нейронная сеть U-Net, которая способна уменьшать пространственное разрешение фотографии, следовательно, потом увеличивать. Данное решение направлено на обнаружение типов нарушений на дороге, но оповещение оператора не предусмотрено, т.е. обзор и обнаружение дефектов просматриваются после извлечения из автотранспорта аппаратуры.

Отличительными характеристиками аналитико-прогностического метода для безопасности движения в состоянии многопоточности являются:

1. Рассмотрение признаков и исследование новых потенциально опасных участков многополосной дороги.
2. Проведение научно-исследовательской работы в области безопасности опасных зон дорожного полотна.
3. Разработка прогностической модели, основанной на исследовании характеристик участка опасной зоны и принятия решения.
4. Узкопрофильное направление анализа участка дороги.
5. Исследование и экспертная оценка с помощью искусственных нейронных сетей.
6. Разработка и внедрение многоагентной модели с помощью обучения с подкреплением на базе Anylogic.
7. Создание цифрового двойника модели алгоритма распознавания опасной ситуации на дороге.

Проблемы безопасности дорожного движения распространены в большей мере в городских условиях, следовательно, считаются актуальными при многопоточном движении. Водитель не может получить качественную информацию о состоянии инфраструктуры вокруг из-за плохой видимости, дальнего расстояния, медленного оповещения о неисправностях на дороге или транспорта. Как было указано в статье «Проблемы безопасности дорожного движения, разбираем по пунктам», даже система коммуникаций между автомобилями, применяемая в многопрофильных направлениях, не позволяет улучшить ситуацию на дороге [4]. WLAN-модуль, встроенный в транспортное средство,

реализует данные опции: связь автомобилей между собой, связь автомобиля и инфраструктуры, отправка сообщений, оповещение. Тем не менее существует вероятность столкновения, если машина стоит за углом, следовательно, система не видит автомобиля и не оповещает об опасной ситуации. Автомобиль притормаживать не будет, вследствие этого авария неизбежна. Бдительность водителя замедляется ввиду большого ожидания, что система оповестит об опасности.

Если в систему коммуникаций между автомобилями встроить блок аналитико-прогностического метода для безопасности движения в состоянии многопоточности, то это позволит улучшить взаимодействие умных камер, светофора и транспортного средства, давая правильный ракурс обстановки объектов инфраструктуры и автомобилей. Благодаря интеллектуальному анализу данных и нейросети, обученной для данной ситуации, вероятность обнаружения и построения безопасной дороги возрастает.

Главной причиной дорожно-аварийных событий является невосприимчивость водителя к угрозе на дороге, запоздалая реакция, и усложняется она многополосностью автодороги [5]. На решение данной проблемы направлен новый метод и условие безопасности движения в состоянии многопоточности.

Материалы и методы

Метод безопасности движения в состоянии многопоточности подразумевает использование блочной схемы. Первая обработка данных выполняется на основе анализа записей видеопотока с городских камер с помощью нейронных сетей.

Один из подходов, который может быть использован в этом случае, это использование сверточных нейронных сетей (CNN) для извлечения признаков из изображений и последующего использования рекуррентных нейронных сетей (RNN) для анализа последовательности кадров. Таким образом, совместное внедрение нейросетей для исследования данных позволит определить неблагоприятные события на перекрестке, т.е. опасную зону для водителей.

Алгоритм обучения с подкреплением применяется в данной разработке для решения задач управления в системе обнаружения опасного участка и ситуации на дороге. Главная цель агента – это анализ стратегии обнаружения таких участков и получения вознаграждения за правильный результат. Из-за разного подхода к проблеме поиска эффективного пути алгоритмами обучения с подкреплением Q-learning и SARSA необходимо дать оценку построенной модели, чтобы определить оптимально подходящий алгоритм. Агент Q-learning изучает свою карту модели на основе оптимальной политики, которая всегда выбирает действие с наибольшим значением Q, т.е. с максимальным значением действия, имея большое вознаграждение. У агента SARSA политика в системе другая, при высокой отрицательной награде агент выберет простой путь к конечной цели, а это значит, что больше времени потратит на определение этого пути. Благодаря программному обеспечению для имитационного моделирования Anylogic данные алгоритмы можно применить к цифровой модели системы многопоточного движения. При использовании инструментов ПО Anylogic выстраиваются главные компоненты модели цифрового двойника для проведения исследований и обучения нейронной сети. Параметры

статистики, скорости, времени переключения световых индикаторов светофора позволяют использовать в качестве признаков для агентов. Так как для определения опасной ситуации на перекрестке требуется быстрота отклика агента и высокая производительность, в большей мере применим алгоритм Q-learning. Математическая интерпретация данного алгоритма гласит: новое значение Q-функции должно учитывать текущее значение, полученную награду, ожидаемую награду на новом состоянии и фактор дисконтирования. Главной отличительной чертой Q-learning от SARSA является максимизация выбора стратегии ответа, как показано в формуле

$$Q_{\text{new}}(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)]. \quad (1)$$

Одна из главных проблем Q-learning заключается в том, что он может не сходиться с оптимальным значением Q-функции, если агент случайным образом выбирает действия на ранних этапах обучения. Для решения данной проблемы применяется метод эпсилон-жадный (epsilon-greedy).

Эпсилон-жадная стратегия хорошо работает в задачах, где вероятность выбора оптимального действия высока, но при этом требуется некоторый уровень исследования альтернативных действий. Задача определения опасного участка и неблагоприятного события предполагает, что построенная модель в программной среде для обучения имеет действия с максимальной наградой, которые характеризуются признаками: скоростью, временем и т.д. Все эти признаки также рассматриваются для обоснования и проверки гипотез, описанных в пункте «Постановка задачи».

Сначала определяется некоторая вероятность ϵ , которая является параметром алгоритма и обычно находится в диапазоне от 0 до 1. Затем на каждом шаге обучения с вероятностью ϵ агент выбирает случайное действие из возможных, а с вероятностью $1-\epsilon$ выбирает действие с наибольшим значением Q-функции на текущем состоянии.

Таким образом, эпсилон-жадный алгоритм позволяет агенту исследовать новые действия с некоторой вероятностью, даже если они не имеют максимального значения Q-функции на текущем состоянии. Это позволяет агенту изучать новые стратегии поведения и находить лучшие решения в сложных задачах.

Интегрированный блок управления системы для безопасного движения в состоянии многопоточности состоит из компонентов обработки и анализа данных, передатчика и приемника.

Результаты

Для решения данной задачи выберем участок на Алтуфьевском шоссе. Участок имеет большие многополосные дороги со множеством перекрестков, светофоров и пешеходных переходов. Данная сеть имеет достаточно объемные данные для анализа и т.п. На рис. 1 показан скриншот спутниковой карты этой местности. Данное исследование проводится путем анализа 6 перекрестков и 5 дорог, которые имеют от 2 до 5 полос (рис. 2, 3). Выбранный участок движения характеризуется большим количеством потока автотранспорта и выбором направления пути.



Рис. 1. Скриншот многополосных дорог и перекрестков, Алтуфьевское шоссе

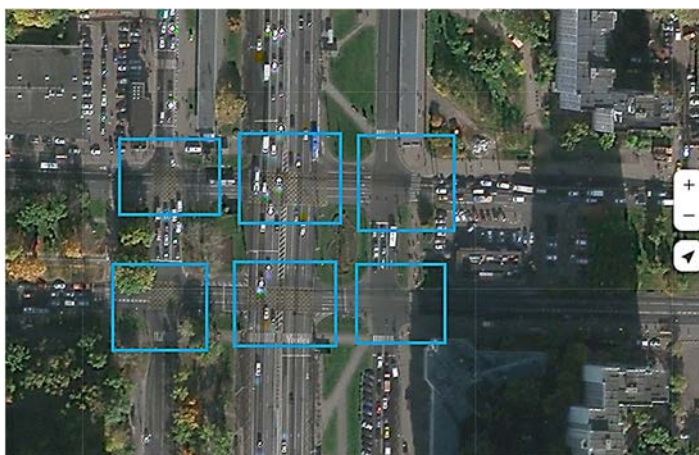


Рис. 2. Скриншот участка Алтуфьевского шоссе, перекрестки обозначены синим цветом

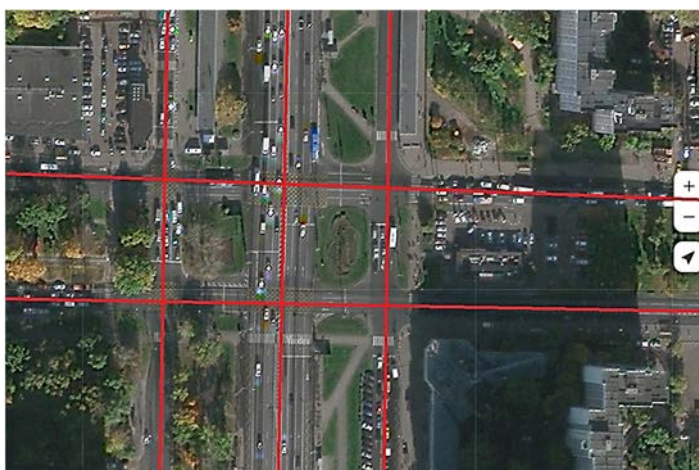


Рис. 3. Скриншот карты Яндекс, дороги показаны красным цветом

Построение автомагистрали выполняется с помощью геометрии и библиотек имитационного моделирования в программной среде AnyLogic. После готовности геометрии аварийного участка с помощью наложения линий дорог на карту местности происходит добавление потоков автомобилей для каждого из направлений маршрутов. Таких маршрутов насчитывается 12. При помощи алгоритма, состоящего из элементов carSource, carMoveTo, carDispose и traffic-light, проектируются модели транспортных маршрутов [6]. Таким образом, определяются признаки неблагоприятных событий и устанавливаются критерии благоприятных событий [7].

Чтобы правильно организовать процесс анализа автомобильного потока, следует определить:

1. Цель.
2. Сцену.
3. Набор параметров.
4. Элементы управления.
5. Статистику.

Построение автомобильного потока и маршрутов наземного пассажирского транспорта проводятся с помощью Яндекс-карт. Транспортное движение участка Алтуфьевского шоссе, как показано на рис. 4, проектируется по автомобильному маршруту на дорогах и перекрестках.

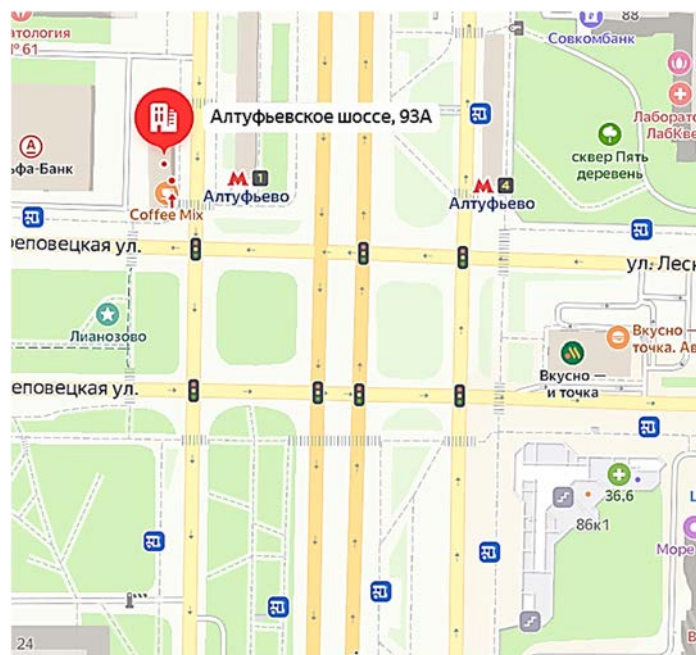


Рис. 4. Построение в программной среде AnyLogic плана автомобильного потока по карте движения Яндекс, участок Алтуфьевского шоссе

Проблемные участки дороги моделируются с учетом правил ПДД, внутреннего движения в городе, светофоров и стоп-линий [8]. Это позволяет в полной мере увидеть происходящую ситуацию на дороге и предпринять необходимые меры безопасного движения, чтобы не допустить дорожных происшествий. Данный участок рассматривался на заседаниях комиссии по

безопасности дорожного движения в префектуре. Здесь было много аварий с участием пешеходов. Рядом с этими участками располагаются семь корпусов школ и Училище олимпийского резерва, как обозначено в источнике [9].

На рассматриваемом участке определены опасные зоны движения машин. Из-за резкого увеличения числа автомобилей вероятность возникновения аварий становится выше. Сформированный поток машин показан на рис. 5.

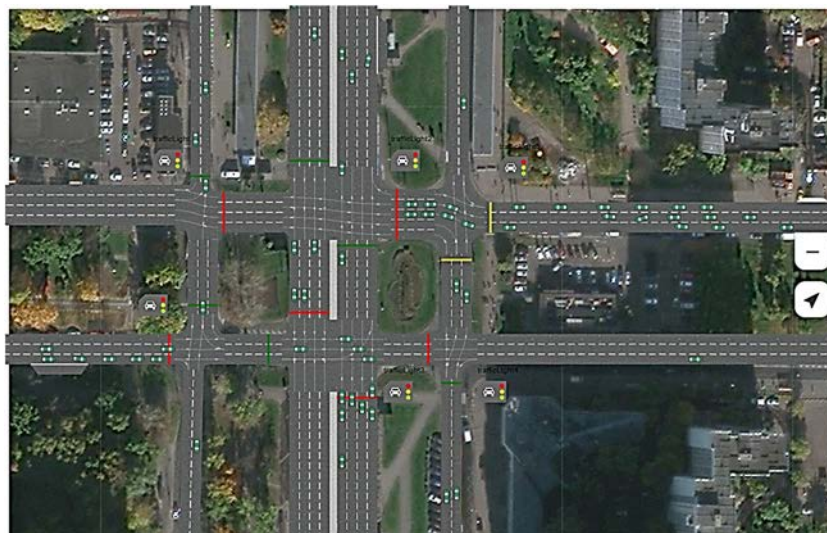


Рис. 5. Сформированный поток машин в имитационной среде AnyLogic

Для оптимизации длительности фаз имеющихся шести светофоров требуется ввести новые параметры [10]. В качестве целевой функции используется среднее время проезда машин на перекрестках. Специально для эксперимента построена популяция на агенте `main`, которая обозначена как «автомобиль». Для каждого потока машин была выбрана новая популяция. На гистограмме «ВремяПроезда» указана статистика времени проезда каждого перекрестка. Все вышеприведенные действия показаны на рис. 6.

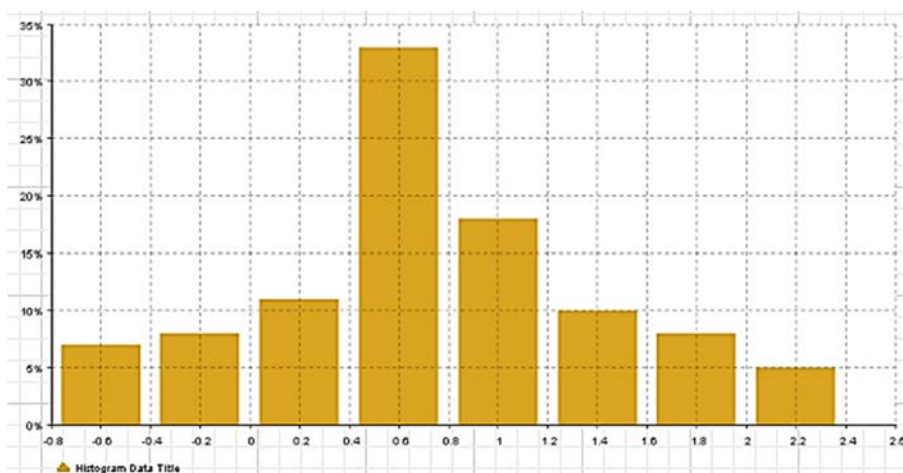


Рис. 6. Гистограмма «Время проезда» перекрестка

На рис. 7 показаны главные составляющие модели, блоки для реализации автомобильного потока, схема многопоточного движения и параметры, измеряющие время проезда модели автомобиля, в зависимости от потока (существует 10 автомобильных потоков и один автобусный поток).

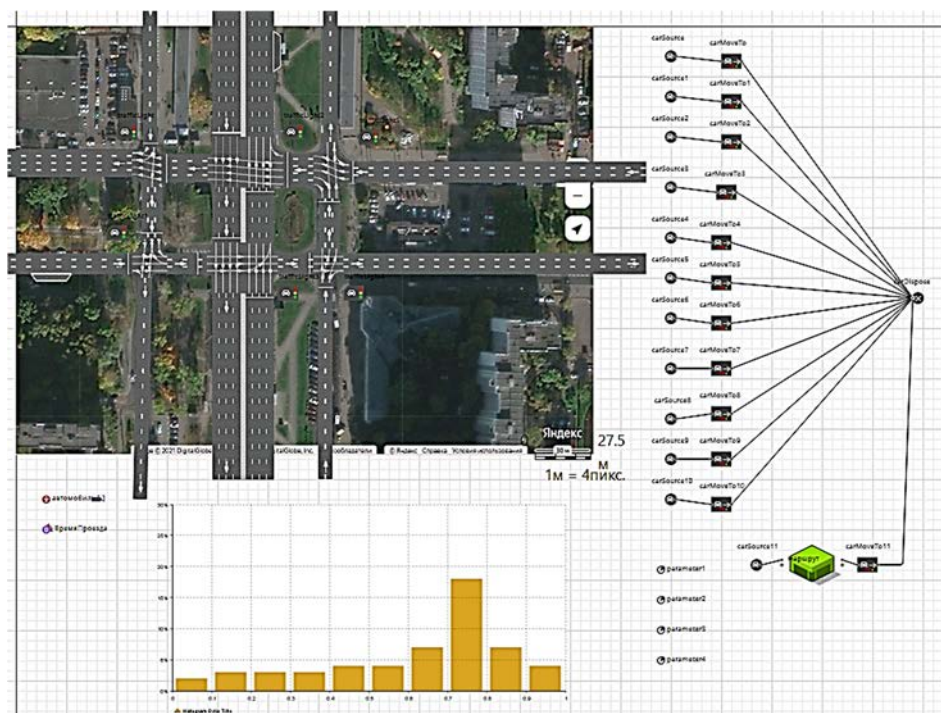


Рис. 7. Создание блок-схемы анализа аварийных участков

В параметре «ВремяПроезда» можно наблюдать среднее время проезда автомобиля – 69.157, такое значение является нормальным (рис. 8, справа). В эксперименте по оптимизации лучший средний показатель составил 67.106 (рис. 8, слева).

car_flow_analysis : Optimization

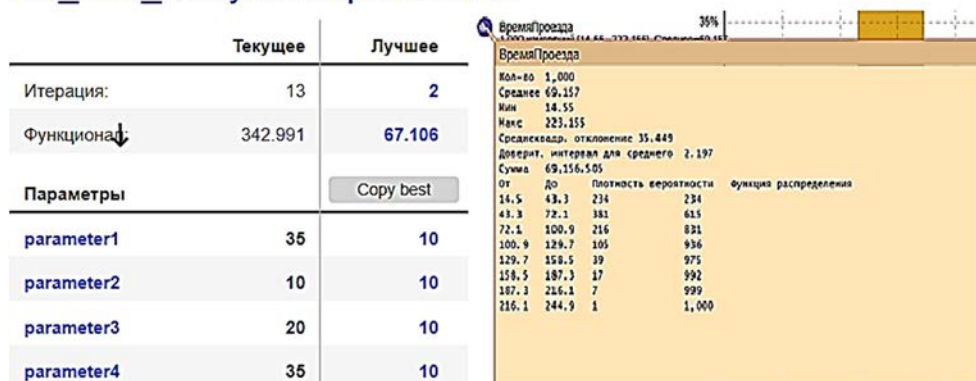


Рис. 8. Определение среднего времени проезда автомобилем перекрестка

Проблема, на решение которой направлены все действия в программной среде, – это повышенный риск встречному потоку столкнуться с машиной, находящейся в опасной зоне. Опасная зона характеризуется направлением основного и встречного потока в моменте, когда машина остановилась внутри перекрестка. Данную ситуацию можно наблюдать на рис. 9. Когда светофор горит зеленым цветом, водитель продолжает движение, и в этот период существует высокая вероятность, что машина не успеет затормозить, а водитель не справится с управлением. Частота аварий, по прогнозам карт, конспектируется во время утреннего движения и вечерних пробок. Отсутствие концентрации, усталость и беспечность водителя отягощают последствия аварии. Чтобы помочь водителю преодолеть опасность и не быть причиной смерти другого человека, требуется ввести определенные условия безопасности на дороге, разработать методику работы светофора и камер именно для передачи сигналов переключения светофора на красный свет во время опасной ситуации.

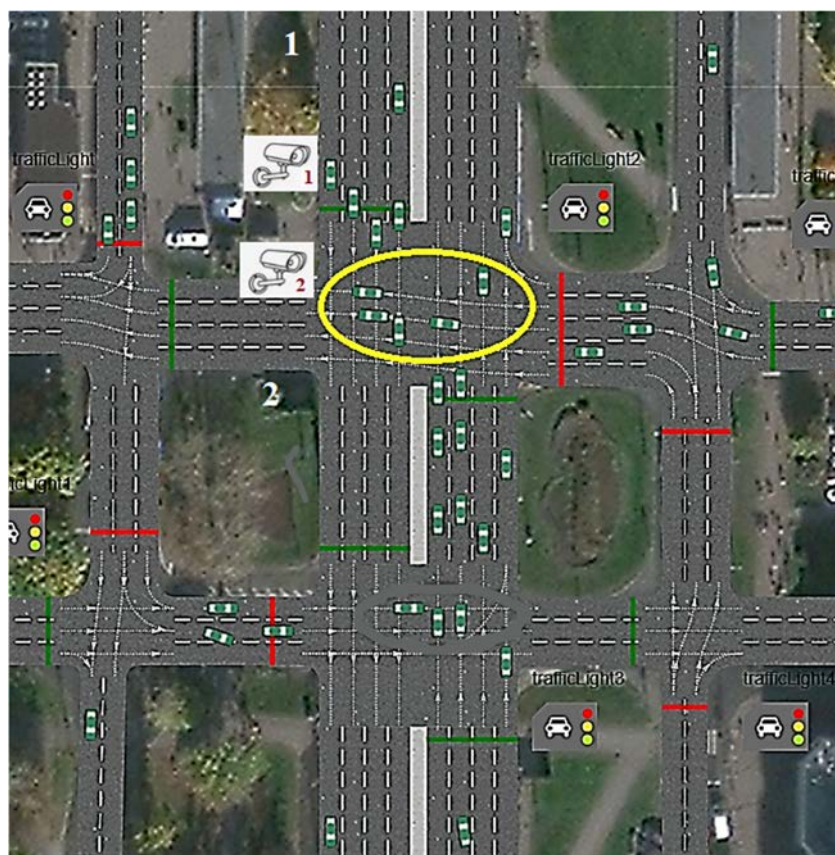


Рис. 9. Опасная зона риска автомобильной катастрофы

Камеры города оборудованы умной системой обнаружения и комплексной политикой передачи данных, следовательно, есть возможность использовать алгоритм распознавания ситуации и начать регулировать светофор в короткие сроки. Для корректной работы системы камер умного видеонаблюдения следует подготовить обучающую выборку для нейросети [11]. Обучающая выборка должна состоять из множества происходящих ситуаций

с автомобилями, находящимися в условии риска встречного столкновения [12]. По факту готовности обученной модели нейросети результаты внедряются в базу знаний для аналитико-прогностической системы, чтобы обеспечивать возможность своевременного оповещения автомобилистов об опасной ситуации на дороге путем переключения сигнальных огней светофора.

При построении инструментами имитационного моделирования аналитической модели потока машин был выявлен риск столкновений основного и встречного потоков автомобилей [13]. Желтым цветом на рис. 9 показана смоделированная ситуация направления машин в момент работы светофора при включении зеленого цвета. Желтым кругом отмечена предаварийная ситуация: совершение встречным потоком машин наезда на автомобиль, находящийся в опасной зоне передвижения на перекрестке. В реальной обстановке водитель может затормозить или увернуться, но такое решение создаст еще более критическую ситуацию. Автомобили, которые едут по полосе за объектом исследования, примут либо то же самое решение, либо создадут аварию с участием всех последующих транспортных средств. При запуске модели демонстрируется опасный участок в состоянии многопоточности и подтверждается аварийная ситуация, а именно гипотеза 2.

Метод поиска неблагоприятных событий на дороге основывается на применении алгоритмов распознавания (глубинные нейронные сети), машинного обучения и анализа данных, следовательно результатом работы является аналитико-прогностическая модель обнаружения опасной зоны, показана составной частью метода на рис. 10.

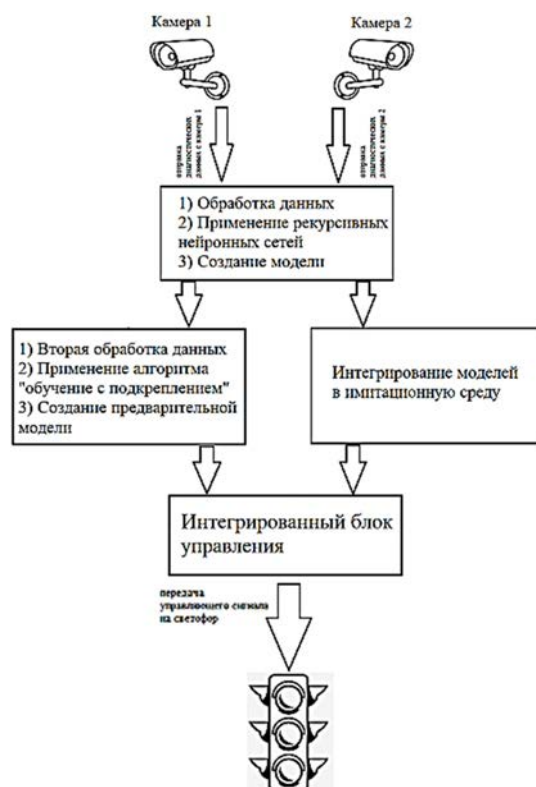


Рис. 10. Метод определения неблагоприятного события и опасной зоны на многополосной дороге

Опасная зона создается в момент движения встречного потока на зеленый свет светофора в направлении перекрестка, на котором в этот момент времени находятся машины. Задача алгоритма – подать сигнал после обработки информации с видеопотока, на светофор, тем самым переключив его на красный.

Дальнейшее применение алгоритмов машинного обучения, а именно обучение с подкреплением, выполняет условие в данной среде – если машина есть на перекрестке, то должна быть и другая машина на встречной перпендикулярной полосе движения. Следовательно, программа переключается на просмотр камеры 1, далее применяется алгоритм распознавания видеопотока и выполняется условие:

1. Если есть машины, то включается красный свет светофора для данной полосы движения.

2. Если нет машин на расстоянии, равном тормозному пути автомобиля, продолжает гореть зеленый.

Для более подробного анализа видеопотока требуется использовать две камеры, направленные на перекресток, т.е. место неблагоприятного события и на перпендикулярно расположенную встречную полосу движения. Далее собранные данные идут на обработку с помощью глубоких нейронных сетей и в блок управления безопасностью со встроенным алгоритмом обучения. Расположение камер показано на рис. 9, камера 1 направлена на перпендикулярно расположенную к перекрестку встречную полосу движения, также камера 2 направлена на исследуемый перекресток. Стадия обнаружения опасной зоны строится с использованием рекурсивных нейронных сетей, а именно идет сбор данных с видеопотока камер (1 и 2) и их обработка, следующие шаги основываются на создании модели машинного обучения посредством использования обучения с подкреплением. Результаты данной модели формируются в блок-системы управления, где также формируются сигналы переключения для светофора. Схема алгоритма показана на рис. 10.

Алгоритм нового условия:

1. Проведение научно-исследовательской работы в области безопасности опасных зон дорожного полотна.

2. Рассмотрение подобных случаев и накопление диагностической информации для дальнейшей обработки данных алгоритмом, продемонстрированным на рис. 10.

3. Внедрение процедур усовершенствования в блок-системы безопасности дорожного движения на основе интеллектуального анализа видеопотока.

4. Прогностическая модель карты опасных зон дорожного полотна в городе.

Последующий анализ многопоточного транспортного движения должен определить зависимость времени проезда автомобилей по перекрестку от времени появления машин, создающих риск аварии на основе построенной имитационной модели [14]. Это поможет внести изменения для обновления созданных условий безопасности на дороге, тем самым улучшить характеристики эксплуатации [15].

Программная среда имитационного моделирования AnyLogic способствует высокому качеству интегрирования искусственных нейронных сетей в имитационную модель и позволяет создать цифровой двойник для проверки

аналитико-прогностической модели. Как продемонстрировано в гипотезе 1, фазы светофоров и расположение транспортного средства зависят от параметра, увеличивающего степень аварийности дороги. Данным параметром можно считать опасную зону, следуя формулировке, создание ее в момент движения встречного потока на зеленый свет светофора в направлении перекрестка, на котором в этот момент времени находятся машины. Данное объяснение складывалось из совокупности действий, происходящих в имитационной модели, как показано на рис. 9. Гипотеза 2 гласит об увеличении вероятности столкновения находящихся транспортных средств в опасной зоне, что также подтверждено столкновениями автомобилей в имитационной модели (см. рис. 9). Это обусловлено анализом скорости двух потоков (1 и 2). Скорость автомобиля равна 60 км/ч на Алтуфьевском шоссе, время прибытия до перекрестка по дороге 2 составляет 70 с, а время прибытия по дороге 1 до перекрестка составляет 60 с, эти показатели подтверждают гипотезу 2 и столкновение двух машин.

Обсуждение

Проведенный анализ безопасности движения в состоянии многопоточности предполагает в дальнейшем использование нейронных сетей и машинного обучения. Модель машинного обучения строится на данных, которые разделяются на обучающую выборку и тестовую либо являются пространственными данными с пометками параметров видеопотока. Определение области аварийных участков и создание условий безопасности дает ясность параметров для разработки системы управления защитных мер автомобильного потока как аналитико-прогностического метода для координирования ситуационного процесса дороги. Для создания прогностической модели потребуется актуальная имитационная среда дорожного полотна и прописанные отклики среды для обучения с подкреплением. Преимущественно разработка данной среды будет продолжаться в программе AnyLogic.

В аналитическом обзоре представлены разработки, ориентированные на предотвращения дорожных происшествий. Эти методы определения аварий основаны на внедрении искусственных нейронных сетей и аппаратно-программного комплекса для встраивания в общую систему. Главными отличиями данных разработок от аналитико-прогностического метода, созданного для обнаружения опасных зон и предотвращения аварий, являются:

1. Отсутствие анализа признаков опасных зон на перекрестках, анализ предшествующих характеристик критериев аварий, статистический анализ компонент автомобиля.
2. Отсутствие прогностической модели для выявления возможных опасных участков дорог в городе с помощью сканирования карт и параметров.
3. Отсутствие узкопрофильного исследования данного направления.
4. Отсутствие экспертной оценки с помощью искусственных нейронных сетей.
5. Отсутствие многоагентной модели, построенной с помощью обучения с подкреплением на базе AnyLogic.
6. Отсутствие цифрового двойника на основе прогностической модели распознавания опасной ситуации на дороге.

Заключение

Смоделирована дорожная сеть участка Алтуфьевского шоссе и проведен анализ моделей всех автомобильных потоков, где не было обнаружено трудных мест проезда. Опасный участок был исследован на предмет устранения проблемы.

На основе всех пройденных этапов был сформирован метод определения и предотвращения неблагоприятного события на многополосной дороге, определено новое условие безопасности нахождения в опасной зоне перекрестка. Таким образом, новым условием безопасной ситуации на дороге является предупреждение столкновения с помощью глубинных нейронных сетей и передачи сигнала на светофор для своевременного переключения.

В дальнейшем введенные параметры анализа фаз светофора на перекрестке обеспечат высокую точность определения ситуации на дороге с помощью умного видеонаблюдения благодаря алгоритмам поиска зависимостей, что даст возможность создания обучающей выборки и внедрение ее в эксплуатацию перекрестка и светофоров. Предложенная методика безопасного пользования дороги зависит прежде всего от качественного определения местоположения машины на видеопотоке и применения методов машинного обучения.

Список литературы

1. В России запущен первый комплекс для мониторинга состояния дорог при помощи нейросетей. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Система_мониторинга_состояния_дорог_при_помощи_нейросетей_от_Ростелекома (дата обращения: 12.04.2023).
2. В Москве начали использовать нейросети для контроля состояния дорог. URL: <https://tass.ru/obschestvo/17101239> (дата обращения: 12.04.2023).
3. Нейронные сети на страже правил дорожного движения. URL: <https://habr.com/ru/post/509734/> (дата обращения: 12.04.2023).
4. Проблемы безопасности дорожного движения, разбираем по пунктам. URL: <https://habr.com/ru/post/440614/> (дата обращения: 12.04.2023).
5. Юшков В. С., Юшков Б. С., Бургонутдинов А. М. Система активной безопасности и снижение аварийности на автомобильных дорогах // Вестник Московского государственного строительного университета. 2014. № 10. С. 168–176
6. Чжан Л., Зиглер Б. П., Лайли Ю. Разработка моделей для моделирования. 1-е изд. Elsevier, 2019. 453 с.
7. Тарко А. Измерение безопасности дорожного движения с помощью суррогатных событий. 1-е изд. Амстердам : Elsevier, 2019. 252 с.
8. Зеруал А., Хитта М. М., Сан Ю., Харроу Ф. Моделирование и управление дорожным движением: использование статистического мониторинга и глубокого обучения. 1-е изд. Elsevier, 2021. 268 с.
9. На Лескова появилось шесть новых светофоров. URL: <https://svao.mos.ru/presscenter/news/detail/10636013.html> (дата обращения: 12.04.2023).
10. Тан К., Больце М., Накамура Х., Тянь Ц. Мировая практика управления сигналами дорожного движения: фиксированный контроль времени на изолированных перекрестках // Всемирная конференция общества транспортных исследований. 1-е изд. Elsevier, 2019. 344 с.
11. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. 2-е изд., испр. М. : ДМК Пресс, 2018. 652 с.
12. Хинкель Г. NMF: мультиплатформенный фреймворк моделирования // Международная конференция по теории и практике преобразований моделей. Springer, Cham, 2018. С. 184–194.

13. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. СПб. : Питер, 2018. 400 с.
14. Шелухин О. И. Сетевые аномалии. Обнаружение, локализация, прогнозирование. М. : Горячая линия – Телеком, 2019. 448 с.
15. Хасты Т., Тибширани Р., Фридман Дж. Элементы статистического обучения. Интеллектуальный анализ данных, логический вывод и прогнозирование. 2-е изд. Springer, 2009. 745 с.

References

1. *V Rossii zapushchen pervyy kompleks dlya monitoringa sostoyaniya dorog pri pomoshchi neyrosetey = The first complex for monitoring the condition of roads using neural networks has been launched in Russia.* (In Russ.). Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/Proekt:Sistema_monitoringa_sostoyaniya_dorog_pri_pomoshchi_neyrosetey_ot_Rostelekoma (accessed 12.04.2023).
2. *V Moskve nachali ispol'zovat' neyroseti dlya kontrolya sostoyaniya dorog = In Moscow, neural networks began to be used to monitor the condition of roads.* (In Russ.). Available at: <https://tass.ru/obschestvo/17101239> (accessed 12.04.2023).
3. *Neyronnye seti na strazhe pravil dorozhnogo dvizheniya = Neural networks on guard of the rules of the road.* (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/post/509734/> (accessed 12.04.2023).
4. *Problemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya, razbiraem po punktam = Problems of road safety, we analyze them point by point.* (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/post/440614/> (accessed 12.04.2023).
5. Yushkov V.S., Yushkov B.S., Burgonutdinov A.M. Active safety system and reduction of accidents on highways. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta = Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering.* 2014;(10): 168–176. (In Russ.)
6. Chzhan L., Zigler B.P., Layli Yu. *Razrabotka modeley dlya modelirovaniya. 1-e izd. = Development of models for modeling. 1st ed.* Elsevier, 2019:453. (In Russ.)
7. Tarko A. *Izmerenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya s pomoshch'yu surrogatnykh sobytiy. 1-e izd. = Measuring road safety using surrogate events. 1st ed.* Amsterdam: Elsevier, 2019:252. (In Russ.)
8. Zerial A., Khitta M. M., San Yu., Kharrou F. *Modelirovanie i upravlenie dorozhnym dvizheniem: ispol'zovanie statisticheskogo monitoringa i glubokogo obucheniya. 1-e izd. = Traffic modeling and management: using statistical monitoring and deep learning. 1st ed.* Elsevier, 2021:268. (In Russ.)
9. *Na Leskova poyavilos' shest' novykh svetoforov = Six new traffic lights appeared on Leskov.* (In Russ.). Available at: <https://svao.mos.ru/presscenter/news/detail/10636013.html> (accessed 12.04.2023).
10. Tan K., Bol'tse M., Nakamura Kh., Tyan' Ts. World practice of traffic signal control: fixed time control at isolated intersections. *Vsemirnaya konferentsiya obshchestva transportnykh issledovaniy. 1-e izd = World Conference of the Society for Transport Research. 1st ed.* Elsevier, 2019:344. (In Russ.)
11. Gudfellou Ya., Bendzhio I., Kurvill' A. *Glubokoe obuchenie = Deep learning.* Transl. from the English by A.A. Slinkin. 2nd ed., corrected. Moscow: DMK Press, 2018:652. (In Russ.)
12. Khinkel' G. NMF: multiplatform modeling framework. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po teorii i praktike preobrazovaniy modeley = International Conference on the Theory and Practice of Model Transformations.* Springer, Cham, 2018:184–194. (In Russ.)
13. Sholle F. *Glubokoe obuchenie na Python = Deep learning in Python.* Saint Petersburg: Piter, 2018:400. (In Russ.)
14. Shelukhin O.I. *Setevye anomalii. Obnaruzhenie, lokalizatsiya, prognozirovanie = Network anomalies. Detection, localization, forecasting.* Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2019:448. (In Russ.)

15. Khasti T., Tibshirani R., Fridman Dzh. *Elementy statisticheskogo obucheniya. Intel'lektual'nyy analiz dannykh, logicheskiy vyvod i prognozirovanie. 2-e izd. = Elements of statistical training. Data mining, logical inference and forecasting. 2nd ed.* Springer, 2009:745. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Викторович Зыков

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры интеллектуальных
систем информационной безопасности,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78);
профессор, главный научный сотрудник
Высшей школы бизнеса,
Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики»
(Россия, г. Москва, Покровский бульвар, 11)
E-mail: szykov@hse.ru

Sergey V. Zykov

Doctor of technical sciences,
associate professor, professor
of the sub-department of the intelligent
information security systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia);
professor, chief researcher
of the Higher School of Business,
National Research University Higher
School of Economics
(11 Pokrovsky Boulevard, Moscow, Russia)

Святослав Александрович Золотухин

студент кафедры инструментального
и прикладного программного обеспечения,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78)
E-mail: svt.science.lab@gmail.com

Svyatoslav A. Zolotukhin

Student of the sub-departments
of the instrumental and applied software,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Мария Александровна Золотухина

аспирант кафедры цифровых технологий
обработки данных,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78)
E-mail: rtu_mary@mail.ru

Maria A. Zolotukhina

Postgraduate student of the sub-department
of digital data processing technologies,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 22.11.2022

Поступила после рецензирования/Revised 17.04.2023

Принята к публикации/Accepted 04.07.2023

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ТУШЕНИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПОЖАРНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ

В. В. Крымский¹, В. Р. Головенко²

^{1, 2} Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы
МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева,
Санкт-Петербург, Россия

¹ kvv-1982@yandex.ru, ² golovenko.vlad@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы – оценка современной методики тушения пожаров воздушных судов в Российской Федерации, а также оценка эффективности тушения при пожарах тормозных систем воздушных судов различными видами огнетушащих веществ. *Материалы и методы.* Для исследования использовался метод экспертных оценок, работ отечественных специалистов по направлению координации безопасности полетов, предупреждения и тушения пожаров, а также научно-теоретические материалы Министерства транспорта Российской Федерации, документации МЧС России, опубликованные результаты научных исследований и научных трудов в периодических изданиях. *Результаты.* В результате проведенного анализа по тушению пожаров и реагированию на чрезвычайные ситуации при аварийной посадке воздушных судов выявлена необходимость обеспечения подразделений пожарной охраны современными образцами отечественной пожарной техники порошкового или комбинированного тушения, которая будет способствовать уменьшению времени тушения пожаров и увеличению времени для эвакуации пассажиров. *Выводы.* В ходе проведенного анализа были определены возможности и перспективы возможности внедрения практики порошкового или комбинированного тушения для ликвидации пожаров тормозных систем воздушных судов с помощью обеспечения подразделений пожарной охраны аэродромов пожарными автомобилями такого типа, что повысит эффективность борьбы с пожарами и увеличит процент спасенных пострадавших в подобных чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: воздушное судно, тушение пожара, чрезвычайная ситуация, спасение людей, пожарная техника, управление действиями, огнетушащее вещество, пожарное подразделение

Для цитирования: Крымский В. В., Головенко В. Р. Особенности управления при тушении воздушных судов пожарными подразделениями // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 115–124. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-8

FEATURES OF CONTROL WHEN EXTINGUISHING AIRCRAFT BY FIRE DEPARTMENTS

V.V. Krymsky¹, V.R. Golovenko²

^{1, 2} Petersburg State University State Fire Service of Emercom of Russia named after
Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Saint Petersburg, Russia

¹ kvv-1982@yandex.ru, ² golovenko.vlad@mail.ru

Abstract. *Background.* The assessment of modern methods of extinguishing aircraft fires in the Russian Federation was carried out. An assessment of the effectiveness of extinguishing

aircraft braking systems during fires by various types of extinguishing agents has been carried out. *Materials and methods.* The method of expert assessments, the work of domestic specialists in the field of flight safety coordination, fire prevention and extinguishing, as well as scientific and theoretical materials of the Ministry of Transport of the Russian Federation, documentation of the Ministry of Emergency Situations of Russia, published results of scientific research and scientific papers in periodicals were used for the study. *Results.* As a result of the conducted analysis of fire extinguishing and emergency response during the emergency landing of aircraft, the need to provide fire protection units with modern samples of domestic fire fighting equipment of powder or combined extinguishing, which will help reduce the time of extinguishing fires, contributing to an increase in the time for the evacuation of passengers, was revealed. *Conclusions.* In the course of the analysis, the possibilities and prospects of the possibility of introducing the practice of powder or combined extinguishing to eliminate fires of aircraft braking systems by providing aerodrome fire departments with fire trucks of this type, which will increase the effectiveness of fire fighting and increase the percentage of rescued victims in such emergencies.

Keywords: aircraft, fire extinguishing, emergency situation, rescue of people, fire equipment, action management, fire extinguishing agent, fire department

For citation: Krymsky V.V., Golovenko V.R. Features of control when extinguishing aircraft by fire departments. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):115–124. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-8

Введение

Тушение пожаров (далее – ТП) воздушных судов (далее – ВС) возлагается на подразделения службы противопожарного и аварийно-спасательного обеспечения полетов (далее – СПАСОП). Самым дешевым огнетушащим веществом (далее – ОТВ) используемым СПАСОП, является вода, а самым часто используемым – воздушно-механическая пена (далее – ВМП). Само же ВС функционирует за счет слаженной работы большого количества систем, узлов и агрегатов, выход из строя которых может нанести угрозу жизни и здоровью пассажиров и сотрудников СПАСОП.

Тактика тушения пожаров ВС сводится к тому, что СПАСОП организуют подачу ВМП из лафетных стволов в большом объеме (рис. 1), что позволяет одновременно произвести тушение разлива авиационного топлива (или же предотвратить его воспламенение) и охлаждение фюзеляжа ВС, что положительно скажется на состоянии пострадавших пассажиров.



Рис. 1. Тушение пожара Sukhoi Superjet 100 с помощью ВМП в аэропорту Шереметьево

Такой методикой тушения ВС пользуются абсолютно все службы СПАСОП, при том что в ВС существует большое количество пожароопасных зон, таких как силовые установки (двигатели), топливные баки, кислородные баллоны, аккумуляторные батареи и др., эффективность тушения которых можно повысить, используя аэродромные пожарные автомобили (далее – ПА) комбинированного тушения, которые выведены из эксплуатации в аэропортах нашей страны.

Связано это в первую очередь с тем, что все финансовые затраты по содержанию, обслуживанию, закупке, ремонту ПА, оплате заработной платы сотрудников СПАСОП, средств защиты, спасения ложатся на собственника аэропорта. Так как поддержание такого автомобиля в рабочем состоянии гораздо дороже, чем обыкновенного (легкого или тяжелого класса), они не ликвидны для собственника, потому что одновременно необходимо закупать порошок и пену, создавать условия их хранения, а в случае неиспользования по назначению – заниматься их списанием и утилизацией.

В данной работе будет рассмотрен универсальный метод тушения пожаров ВС, которые возникают по самым различным техническим причинам (из-за шасси, системы торможения, аварийной посадки ВС).

Методы исследования

При оценке и обосновании результатов исследования использовались теории и методы, а также практический опыт ТП ВС, был проанализирован ход ТП при разборах произошедших чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) в области аварийной посадки ВС, особо уделено внимание фактам, когда незнание законов физики и тепломеханики, а также отсутствие профильного образования у участников ТП, приводит к трагическим последствиям. Предложенные тактика и методы тушения пожаров с применением новых аэродромных автомобилей порошкового или комбинированного тушения позволяют добиться огромных успехов в области пожарной безопасности, экономики пожарной безопасности, а также по-новому изложить систему предварительного планирования проведения специальных операций по ТП ВС.

Результаты

Шасси – это система опор ВС, обеспечивающая его стоянку, передвижение по аэродрому при взлете, посадке и рулении. Обычно представляет собой несколько стоек, оборудованных колесами.

Самое распространенное, колесное шасси состоит из стоек, механизмов распора, цилиндров уборки-выпуска, складывающихся подкосов, гидролиний тормозов, тормозных суппортов и пневматиков (рис. 2).



Рис. 2. Сложное устройство шасси современного самолета

При детальном рассмотрении устройства шасси можно увидеть, что именно в их устройстве находится интересующая нас тормозная система (рис. 3), которая необходима как при передвижении самолета по взлетно-посадочным полосам (далее – ВПП), так и при посадке летательного аппарата, а конкретно части тормозной системы – тормозные диски, колодки или же барабаны, которые в основном производятся из магниевых сплавов (рис. 4).

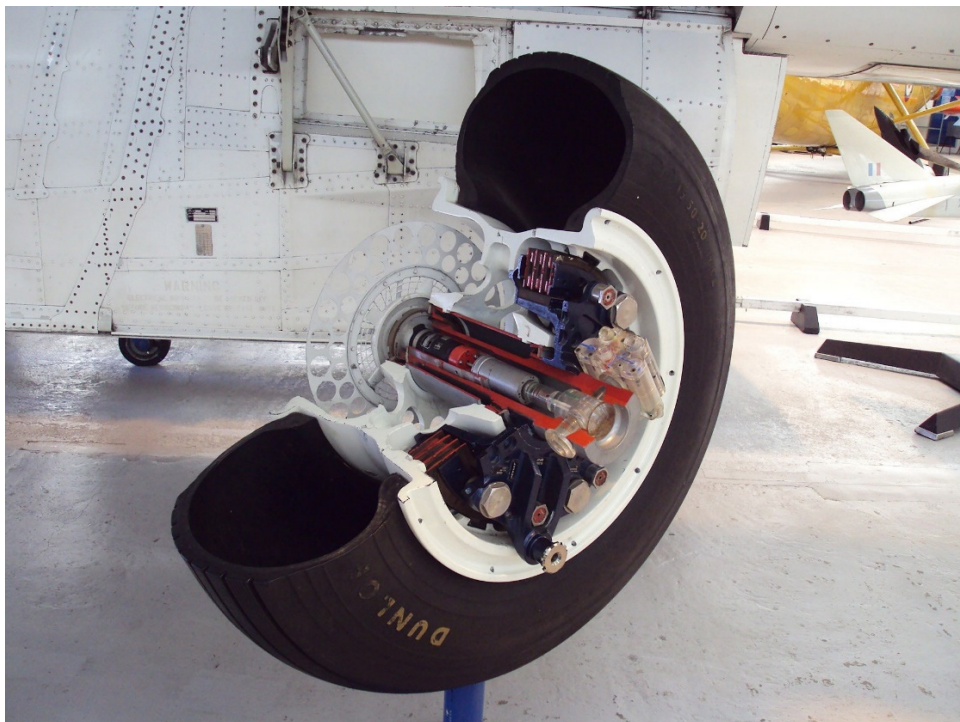


Рис. 3. Внутреннее устройство колеса самолета с многодисковым тормозом



Рис. 4. Магниевые тормозные диски шасси самолета

Магниевого сплавы отлично зарекомендовали себя для самолето- и даже ракетостроения, но главная проблема магниевых сплавов кроется в высокой пожарной опасности магния, а также в тактике тушения пожаров ВС. Магний (Mg) – это легкий металл серебристо-белого оттенка, и высокий интерес к Mg и его сплавам в вопросах самолето- и даже ракетостроения обусловлен тем фактом, что Mg имеет низкую плотность, а следовательно, он очень легкий, устойчив к негативным воздействиям авиационного керосина, различных масел и реагентов, которые представляют собой смесь этиленгликоля и противокоррозионной присадки.

Характерным признаком пожара Mg сплавов является сильное белое свечение, наличие горящего металла и появление белого плотного дыма. В зоне горения магниевых сплавов развивается очень высокая температура (до 3000 °C). Mg нельзя тушить водой, так как он может взорваться из-за выделяющегося при реакции Mg с водой водорода.

Это может привести к взрыву амортизаторов стойки, распространению пожара в гондолу шасси и распространению его на крыло или фюзеляж ВС в зависимости от конструктивной схемы шасси. Вероятность взрыва пневматиков, амортизационных стоек и гидроаккумуляторов очень высока, и ее необходимо учитывать во время проведения операций по спасению людей и тушению пожара ВС.

Такие пожары случаются в следующих ситуациях:

- при посадке ВС с завышенной скоростью или при экстренном торможении;

- горении гидрожидкости при разрушении гидросистемы шасси. При этом развивается высокая температура, приводящая к загоранию резины, а затем и Mg сплавов барабанов колес тележки шасси;

- режиме «Прерванного взлета». Такое название получил режим взлета, при котором уже в процессе разгона ВС для поднятия его в воздух происходит критическая ошибка или же неисправность ВС. В авиации существует такое понятие, как «скорость принятия решения», она изменяется в зависимости от длины и состояния поверхности ВПП и вычисляется исходя из возможности произвести полную остановку ВС, избежав выкатывания за пределы ВПП. В случае если в процессе разгона летательного аппарата ошибка или же неисправность произошли уже после достижения скорости принятия решения, то ВС в любом случае продолжит взлет, уже после которого экипаж будет принимать дальнейшие экстренные решения, такие как, например, экстренная посадка по согласованию с диспетчерской службой аэропорта.

Таким образом, в случае обнаружения неисправности до достижения скорости принятия решения взлет будет прерван на максимальной скорости, и несмотря на то, что помимо колесных тормозов будет также включен реверс и задействованы воздушные тормоза, колесные тормоза претерпят слишком высокую нагрузку трения. Именно в такой ситуации тормоза будут раскалены настолько (рис. 5), что могут загореться сами, повлечь за собой разрушение подшипников, возгорание пневматиков, а также перегреть гидравлическую систему, амортизационные стойки или пневматики настолько, что это может привести к взрыву и пожару всего ВС.



Рис. 5. Раскаленные тормоза самолета после экстренного торможения

Самым опасным в данной ситуации будет сценарий разгерметизации топливных баков в крыле самолета, розлив авиационного топлива и его воспламенение. Это сильно осложнит сложившуюся ситуацию и может привести к большому материальному ущербу и количеству человеческих жертв.

Чтобы этого не допустить, нужно максимально быстро снизить температуру тормозной системы, в частности тормозов из Mg сплавов. Как уже было сказано выше, этого можно эффективно достичь применением порошковых составов, подаваемых из второго лафетного ствола для подачи порошка ПА комбинированного тушения.

При тушении порошком на горячей поверхности образуется слой спекшейся корочки (рис. 6), который прекращает горение посредством изолирования – прекращения доступа к огню кислорода. После чего потушенную поверхность, а также все находящиеся рядом системы и агрегаты, которые неизбежно нагреются при пожаре, такие как стойка шасси, гидравлическая или пневматическая тормозные линии, тормозные суппорты и пневматики, необходимо будет охладить высокоинтенсивной подачей ВМП низкой кратности или даже распыленными струями воды, чтобы не допустить их разрывов от повышенного внутреннего давления.



Рис. 6. Образование слоя спекшейся корочки на поверхности металлического изделия при тушении порошковым составом

В случае же совместного горения разлива топлива и Mg сплавов тормозной системы ВС в первую очередь необходимо ВМП низкой кратности из лафетных стволов потушить разлитое топливо, затем подать порошковый состав на тормозную систему и приступить к охлаждению тележки шасси струями ВМП низкой кратности.

Для обеспечения своевременного эффективного покрытия тормозов порошковым составом можно предложить как внедрение практики обеспечения СПАСОП автомобилями порошкового или комбинированного тушения, которые будут применяться именно в ситуациях экстренного торможения и воспламенения шасси, так и внесение небольших изменений в конструкцию шасси ВС в виде монтажа в них автоматических систем порошкового пожаротушения, которые будут срабатывать при достижении тормозами определенной температуры, но только после полной остановки ВС, иначе работа тормозной системы может быть нарушена и эффективность торможения снизится, из-за чего может произойти выкатывание ВС за пределы ВПП.

Выводы

Из всего вышесказанного следует, что в наши дни для тушения пожаров ВС применяется ВМП, она очень эффективна и является при тушении таких пожаров основным ОТВ, но нужно задуматься – стоит ли для всех аварий ВС применять только лишь это ОТВ, ведь ЧС случаются самые разные, и дифференцировав подходы, методы и тактику тушения различных пожароопасных зон ВС, можно увеличить эффективность тушения, а главное – уменьшить человеческие жертвы! Таким образом, для тушения пожаров шасси ВС было предложено использование огнетушащих порошковых составов, так как тормозные системы ВС изготавливаются на основе магниевых сплавов. Да, огнетушащие порошковые составы – это весьма дорогостоящие ОТВ, но всегда нужно помнить о том, что первоочередной задачей как для сотрудников СПАСОП, так и МЧС России является поддержание высокой эффективности проводимых работ в целях спасения людей.

Список литературы

1. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Аварийно-спасательное обеспечение полетов воздушных судов» : приказ Министерства транспорта Российской Федерации № 517 от 26.11.2020.
2. Головенко В. Р. Специфика тушения пожаров воздушных судов // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. (г. Москва, 17–18 марта 2022 г.). М. : Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. Ч. 1. С. 260–263. EDN: OYNENE
3. Головенко В. Р. Управление действиями пожарных подразделений при крушении самолета // Актуальные вопросы пожаротушения : сб. материалов II Всерос. круглого стола (г. Иваново, 26 мая 2022 г.). Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. С. 53–61. EDN: JFXXUR
4. Крымский В. В., Головенко В. Р. Современное состояние вопроса управления оперативно-тактическими действиями пожарных подразделений при тушении воздушных судов // Угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах в условиях проведения специальной военной операции :

материалы межвуз. семинара (г. Санкт-Петербург, 6 октября 2022 г.). СПб. : Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, 2022. С. 52–55. EDN: CIWXQP

5. Головенко В. Р. Порядок определения категории аэропортов по уровню требуемой пожарной защиты // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы Междунар. XXXIV науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России (г. Балашиха, 23–24 августа 2022 г.). М. : Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 453–459. EDN: RDYOPY
6. Крымский В. В., Головенко В. Р., Юрченко Р. А. Применение установки генерации температурно-активированной воды при тушении пожаров воздушных и морских судов // Пожарная и аварийная безопасность : сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-й годовщине образования гражданской обороны (г. Иваново, 24 ноября 2022 г.). Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 415–420. EDN: KOXTPS
7. Головенко В. Р. Пожарно-техническое вооружение и оборудование, применяемое при ликвидации аварий воздушных судов // Профессиональное юридическое образование и наука. 2022. № 4. С. 20–26. EDN: ROFUBX
8. Воднев С. А., Матвеев А. В. Оценка эффективности реагирования аварийно-спасательных служб на чрезвычайные ситуации на транспорте // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 2. С. 110–117. EDN: XDDTYZ
9. Воднев С. А., Матвеев А. В. Многокритериальная система оценки эффективности управления техническим обеспечением аварийно-спасательных служб // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2018. № 3. С. 72–80. EDN: VJMTNU
10. Гулюгина Т. М., Мерзликин И. Н. Тушение пожаров на воздушных судах на аэродромах гражданской авиации // Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (FireSafety 2020). 2020. С. 225–228.
11. Горнов Ю. Н., Багаутдинов М. Р. Повышение эффективности тушения летательных аппаратов // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2016. С. 191–195. EDN: XEBUWT

References

1. *Ob utverzhdenii Federal'nykh aviatsionnykh pravil «Avariyno-spasatel'noe obespechenie poletov vozdushnykh sudov»: prikaz Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii № 517 ot 26.11.2020* = On the approval of the Federal Aviation Regulations "Emergency and Rescue support of Aircraft flights": Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 517 dated 11.26.2020. (In Russ.)
2. Golovenko V.R. Specifics of extinguishing aircraft fires. *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch. (g. Moskva, 17–18 marta 2022 g.)* = *Firefighting: problems, technologies, innovations : materials of the VIII International scientific and practical conference : in 2 parts (Moscow, March 17–18, 2022)*. Moscow: Akademiya Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony,

- chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy, 2022;(part 1):260–263. (In Russ.). EDN: OYNENE
3. Golovenko V.R. Managing the actions of fire departments in the event of an airplane crash. *Aktual'nye voprosy pozharotusheniya: sb. materialov II Vseros. kruglogo stola (g. Ivanovo, 26 maya 2022 g.) = Topical issues of firefighting : collection of materials II All-Russian round table (Ivanovo, May 26, 2022)*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MChS Rossii, 2022:53–61. (In Russ.). EDN: JFXXUR
4. Krymskiy V.V., Golovenko V.R. The current state of the issue of managing operational and tactical actions of fire departments when extinguishing aircraft. *Ugrozy vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na potentsial'no opasnykh ob'ektakh v usloviyakh provedeniya spetsial'noy voennoy operatsii: materialy mezhvuz. seminara (g. Sankt-Peterburg, 6 oktyabrya 2022 g.) = Threats of emergency situations at potentially dangerous objects in conditions of a special military operation: materials of the inter-university seminar (Saint Petersburg, October 6, 2022)*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy universitet Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyami likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy imeni Geroya Rossiyskoy Federatsii generala armii E. N. Zinicheva, 2022:52–55. (In Russ.). EDN: CIWXQP
5. Golovenko V.R. The procedure for determining the category of airports by the level of required fire protection. *Aktual'nye problemy pozharnoy bezopasnosti: materialy Mezhdunar. XXXIV nauch.-prakt. konf., posvyashch. 85-letiyu obrazovaniya FGBU VNIPO MChS Rossii (g. Balashikha, 23–24 avgusta 2022 g.) = Actual problems of fire safety : materials of the International XXXIV scientific and practical conference, dedicated. To the 85th anniversary of the formation of the FSBI VNIPO EMERCOM of Russia (Balashikha, August 23–24, 2022)*. Moscow: Vserossiyskiy ordena «Znak Pocheta» nauchno-issledovatel'skiy institut protivopozharnoy oborony Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy, 2022:453–459. (In Russ.). EDN: RDYOPY
6. Krymskiy V.V., Golovenko V.R., Yurchenko R.A. Application of the temperature-activated water generation unit for extinguishing fires of aircraft and ships. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost': sb. materialov XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 90-y godovshchine obrazovaniya grazhdanskoy oborony (g. Ivanovo, 24 noyabrya 2022 g.) = Fire and emergency safety : collection of materials of the XVII International scientific and practical conference, dedicated. The 90th anniversary of the formation of Civil Defense (Ivanovo, November 24, 2022)*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy, 2022:415–420. (In Russ.). EDN: KOXTPS
7. Golovenko V.R. Fire-technical armament and equipment used in the liquidation of aircraft accidents. *Professional'noe yuridicheskoe obrazovanie i nauka = Professional legal education and science*. 2022;(4):20–26. (In Russ.). EDN: ROFUBX
8. Vodnev S.A., Matveev A.V. Assessment of the effectiveness of emergency response services to emergencies in transport. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere*. 2019;(2):110–117. (In Russ.). EDN: XDDTYZ
9. Vodnev S.A., Matveev A.V. Multi-criteria system for evaluating the effectiveness of technical support management of emergency services. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii = Bulletin of the Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2018;(3):72–80. (In Russ.). EDN: VJMTNU

10. Gulyugina T.M., Merzlikin I.N. Extinguishing fires on aircraft at civil aviation airfields. *Sovremennye problemy pozharной bezopasnosti: teoriya i praktika (FireSafety 2020) = Modern problems of fire safety: theory and practice (FireSafety 2020)*. 2020:225–228. (In Russ.).
11. Gornov Yu.N., Bagautdinov M.R. Improving the efficiency of extinguishing aircraft. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. Vseros. molodezh. nauch.-prakt. konf. (g. Irkutsk, 11 noyabrya 2016 g.) = Aircraft engineering and transport of Siberia : collection of articles by All-Russian youth. scientific and Practical conference (Irkutsk, November 11, 2016)*. Irkutsk: Irkutskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskii universitet, 2016:191–195. (In Russ.). EDN: XEBUWT

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Вячеславович Крымский

кандидат экономических наук, доцент,
заместитель начальника института
профессиональной подготовки,
Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной
службы МЧС России имени Героя
Российской Федерации генерала армии
Е. Н. Зиничева
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Московский пр-кт, 149)
E-mail: kvv-1982@yandex.ru

Vitaly V. Krymsky

Candidate of economic sciences, associate
professor, deputy head of the Institute
of Professional Training,
Petersburg State University State Fire
Service of Emercom of Russia
named after Hero of the Russian Federation,
Army General E.N. Zinichev
(149 Moskovsky avenue, Saint Petersburg,
Russia)

Владислав Романович Головенко

адъюнкт факультета подготовки кадров
высшей квалификации,
Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной
службы МЧС России имени Героя
Российской Федерации генерала армии
Е. Н. Зиничева
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Московский пр-кт, 149)
E-mail: golovenko.vlad@mail.ru

Vladislav R. Golovenko

Postgraduate of the faculty
of postgraduate studies,
Petersburg State University State Fire
Service of Emercom of Russia
named after Hero of the Russian Federation,
Army General E.N. Zinichev
(149 Moskovsky avenue, Saint Petersburg,
Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 13.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2023

Принята к публикации/Accepted 04.07.2023

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И НЕЙРОННОЙ СЕТИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА КРИТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

А. А. Финогеев

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
fanton3@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются вопросы интеллектуального анализа сенсорных данных в защищенной архитектуре системы мониторинга критических событий в дорожной инфраструктуре. *Материалы и методы.* Для интеллектуального анализа, кластеризации и распознавания пакетов предлагается комбинированный подход, который реализуется в архитектуре программно-конфигурируемой сети. Подход включает процедуры фильтрации недопустимого трафика, валидации подлинности сетевых узлов, метод интеллектуального анализа распознавания и кластеризации пакетов сенсорных данных на основе аппарата нечеткой логики и пятислойной нейронной сети в пространстве девяти признаков. Функции принадлежности к нетипичным пакетам настраиваются в процессе обучения нейронной сети, а вывод о степени сходства формируется с помощью аппарата нечеткой логики. *Результаты.* Предложена архитектура защищенной системы мониторинга с четырьмя слоями и шестью уровнями управления данными. В архитектуре предусмотрена подсистема интеллектуального анализа и кластеризации, которая включает модули валидации сетевых узлов и фильтрации трафика, парсер и анализатор пакетов на базе нечеткой логики и нейронной сети, модуль журнализации. *Выводы.* Преимуществами предложенной системы мониторинга являются: архитектура программно-конфигурируемой сети, встроенные механизмы анализа сетевого трафика, метод распознаваний и кластеризации пакетов, способ валидации сетевых узлов, методика фильтрации недопустимого трафика от скомпрометированных узлов.

Ключевые слова: система мониторинга, программно-конфигурируемая сеть, сенсорные данные, нечеткая логика, нейронная сеть, кластеризация

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10087).

Для цитирования: Финогеев А. А. Интеллектуальный анализ сенсорных данных на основе нечеткой логики и нейронной сети в системе мониторинга критических событий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 125–141. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-9

INTELLIGENT ANALYSIS OF SENSORY DATA BASED ON FUZZY LOGIC AND NEURAL NETWORK IN CRITICAL EVENT MONITORING SYSTEMS

A.A. Finogeev

Penza State University, Penza, Russia
fanton3@yandex.ru

© Финогеев А. А., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. Background. The article deals with the issues of intellectual analysis of sensory data in a secure architecture of a system for monitoring critical events in the road infrastructure. **Materials and methods.** For intellectual analysis, clustering and packet recognition, a combined approach is proposed, which is implemented in the architecture of a software-defined network. The approach includes procedures for filtering invalid traffic, validating the authenticity of network nodes, a method of intellectual analysis of recognition and clustering of sensor data packets based on a fuzzy logic apparatus and a five-layer neural network in the space of nine features. The function of belonging to atypical packages is adjusted in the process of training the neural network, and the conclusion about the degree of similarity is formed using the fuzzy logic apparatus. **Results.** The architecture provides for a subsystem of intellectual analysis and clustering, which includes modules for validating network nodes and traffic filtering, a parser and packet analyzer based on fuzzy logic and a neural network, and a logging module. **Conclusions.** The advantages of the proposed monitoring system are: software-defined network architecture, built-in network traffic analysis mechanisms, packet recognition and clustering method, network node validation method, invalid traffic filtering method from compromised nodes.

Keywords: monitoring system, software defined network, sensor data, fuzzy logic, neural network, clustering

Acknowledgements: the study was supported by a grant from the Russian Scientific Foundation (project № 20-71-10087).

For citation: Finogeev A.A. Intelligent analysis of sensory data based on fuzzy logic and neural network in critical event monitoring systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):125–141. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-9

Введение

Внедрение технологий Интернета вещей (IoT) в различные сферы человеческой жизнедеятельности привело к широкому распространению межмашинного взаимодействия. Увеличение числа таких взаимодействий между узлами сенсорных сетей привело к росту угроз информационной безопасности [1]. Повышение риска информационных атак связано с ростом количества киберфизических устройств IoT и мобильных средств связи для доступа к данным по распределенным телекоммуникационным каналам [2]. Наибольшую угрозу в открытых сетевых системах представляют атаки флудинга в виде генерации большого числа запросов к сетевым узлам [3]. Для защиты распределенных систем мониторинга предлагается использовать интеллектуальную подсистему анализа сетевого трафика на основе аппарата нечеткой логики и нейронной сети.

Сбор, обработка и хранение данных являются основными операциями в системах мониторинга критических событий на пространственно-распределенных объектах дорожно-транспортной инфраструктуры [4]. Подобные системы работают с большими сенсорными данными, которые содержат информацию о дорожно-транспортных происшествиях и нарушениях правил дорожного движения [5]. Данные собираются с множества фоторадарных комплексов фото- и видеофиксации инцидентов, а также с камер видеонаблюдения, которые объединены единой сетевой инфраструктурой в рамках концепций «Безопасный город» и «Безопасные дороги».

В последнее время исследователи предлагают способы использования архитектуры программно-конфигурируемых сетей (Software Defined Network –

SDN) для защиты сетевых систем [6, 7]. Внедрение архитектуры SDN-сети для создания транспортной среды обусловлено необходимостью применения новых подходов к обнаружению и предотвращению угроз информационной безопасности. SDN-технология представляет собой централизованный способ управления и настройки сетевых коммутаторов, который позволяет минимизировать риски и последствия информационных атак [8, 9]. Основная идея сводится к отделению уровня логического управления сетью от уровня коммутации и ретрансляции пакетов данных в коммутаторах [10]. Однако SDN-архитектура имеет ряд ограничений. Во-первых, следует отметить проблему масштабируемости SDN из-за централизации управления потоками данных в контроллере [11]. Во-вторых, в случае распределенных DDoS-атак контроллер не успевает обрабатывать входящие запросы и генерировать новые правила таблиц потоков для коммутаторов [12]. В связи с этим для эффективного использования SDN-архитектуры необходимы методы и средства обнаружения атак на основе технологий машинного обучения, интеллектуального и статистического анализа, нейронных сетей [2, 13].

В работе [14] авторами сделан обзор решений для обнаружения и предотвращения DDoS-атак с использованием SDN-архитектуры и предложена платформа проактивного обнаружения подобных атак в корпоративных сетях. В статье [15] для защиты IoT сетей предлагается использование SDN, блокчейн и технологии виртуализации сетевых функций. Авторами представлен обзор решений по безопасности с констатацией таких проблем, как отсутствие стандартизации, низкая эффективность выявления вредоносного трафика, большие задержки при росте числа атак. Архитектура SDN в работе [16] позволяет обнаруживать DDoS-атаки в режиме реального времени с минимальными требованиями к производительности сетевых узлов, что важно для сенсорных сетей низкого энергопотребления. В статье [17] рассмотрена процедура обнаружения флудинг-атак в кэше данных SDN-контроллера. Атаки выявляются в процессе обмена данными между генерирующими устройствами и счетчиками электроэнергии у потребителей. В работе [18] предлагается SDN-архитектура гетерогенной сети, состоящей из мобильных устройств связи, коммутаторов и контроллеров с системой распределенного реестра (блокчейн), которая применяется для шифрования пакетов сенсорных данных перед передачей на сервер и доказательства их подлинности.

Разработанная на основании изученного опыта, в статье представлена архитектура защищенной системы мониторинга критических событий, создаваемой с использованием технологии программно-конфигурируемой сети (SDN), интеллектуального анализа, распознавания и кластеризации пакетов сетевого трафика на основе нечеткой логики и многослойной нейронной сети, технологии распределенного реестра для хранения данных, смарт-контрактов для валидации сетевых узлов, синтеза правил таблиц потоков, анализа и фильтрации сетевого трафика.

Материалы и методы

Основная функция подсистемы защиты операций по сбору и передаче сетевого трафика от распределенных узлов в системе мониторинга состоит в анализе пакетов данных от авторизованных узлов с целью обнаружения нетипичных пакетов с возможным вредоносным содержанием. Архитектура разработанной подсистемы анализа трафика включает парсер, анализатор, модуль кластеризации с нейронной сетью, модуль журнализации (рис. 1).

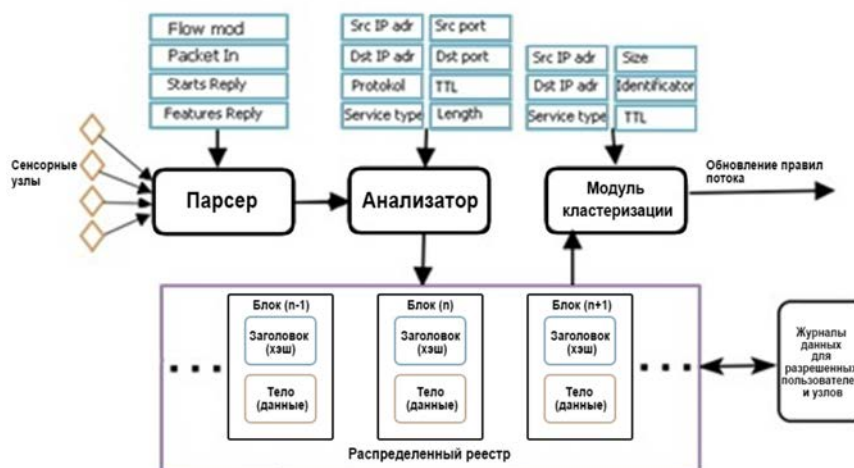


Рис. 1. Подсистема анализа и обнаружения нетипичных пакетов данных

Модули парсинга и интеллектуального анализа необходимы для обнаружения пакетов данных, характеристики которых отличаются от тех, которые обычно передаются от авторизованных узлов. Процедура анализа реализуется в контроллере SDN-сети и позволяет выявлять нетипичное поведение сенсорных узлов и мобильных устройств пользователей. Пакеты выделяются парсером и передаются в анализатор. Модуль анализа извлекает характеристики пакета из заголовков протокольных блоков данных. Характеристики используются для кластеризации блоков данных в пространстве признаков с целью определения степени сходства с центроидами кластеров типичных и нетипичных пакетов, сформированных в процессе обучения нейронной сети. Кластеризация позволяет обнаружить факты модификации заголовков пакетов данных и компрометации сенсорных узлов. Для наборов характеристик нетипичных пакетов контроллер создает правила фильтрации в таблицах потоков, а для нормальных пакетов – правила ретрансляции.

Метод кластеризации пакетов реализован комбинированным способом с использованием аппарата нечеткой логики и нейронной сети. Примером такого подхода является технология обнаружения вторжений в системе ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) [19]. Для синтеза пространства признаков и кластеризации в нем предлагается использовать девять характеристик, извлекаемых из заголовков IP пакетов и TCP сегментов, а именно IP-адрес источника (IP_src), IP-адрес назначения (IP_Dst), длину заголовка (Head_Lng), полную длину пакета (Total_Lng), идентификатор фрагмента (Frag_Id), время жизни пакета (TTL), тип сервиса (Srv_type), номера портов протокола отправителя (Port_Srv) и получателя (Port_Dst). Начальное обучение нейронной сети выполняется на основе наборов характеристик пакетов от неавторизованных узлов, а в дальнейшем для обучения используются выявленные наборы характеристик нетипичных пакетов. Параметры функции принадлежности пакетов к кластерам настраиваются посредством алгоритма обучения нейронных сетей, а вывод о принадлежности и степени сходства с центроидами кластеров формируется с помощью аппарата нечеткой логики.

Метод нечеткой кластеризации базируется на алгоритме fuzzy c-means [20] и включает следующие шаги:

1. Задается число кластеров пакетов M , которое далее корректируется в процессе обучения, выбирается степень нечеткости целевой функции $m > 1$.

2. Входные наборы характеристик пакета представляют вектора признаков X_j ($j = 1, \dots, N$). Вектор определяет точку в пространстве, которая может относиться к кластерам с центроидами $C^{(k)}$ ($k = 1, \dots, M$) и вероятностной функцией принадлежности $\mu_{X_j}^{(k)}$, где $0 < \mu_{X_j}^{(k)} < 1$, $\sum_{k=1}^M \mu_{X_j}^{(k)} = 1$, которая выступает в качестве степени сходства с центроидом и определяется как расстояние $D_{X_j}^{(k)}$.

3. Точки случайным образом распределяются по кластерам. Распределение точек определяется матрицей степеней сходства с центроидами в пространстве признаков с девятью координатами ($x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}, x_{i7}, x_{i8}, x_{i9}$).

4. Вычисляются координаты центроидов кластеров C^k ($k = 1, \dots, M$) посредством вычисления средней близости точек кластера:

$$C_k = \frac{\sum_{j=1}^M (\mu_{X_j}^{(k)} X_j)}{\sum_{j=1}^M (\mu_{X_j}^{(k)})}. \quad (1)$$

5. Определяются расстояния между точками и центроидами кластеров:

$$D_{X_j}^{(k)} = \sqrt{\|X_j - C^{(k)}\|^2}. \quad (2)$$

6. Пересчитываются степени принадлежности точек к кластерам и обновляется матрица распределения точек:

$$\mu_{X_j}^{(k)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^M \left(\frac{D_{X_i}^{(k)}}{D_{X_j}^{(k)}} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (3)$$

где $m > 1$ – коэффициент нечеткости кластеризации.

7. Для остановки итерационного процесса задается параметр $\varepsilon > 0$. Если условие $\{|\mu_{X_j}^{(k)} - \mu_{X_j}^{(k-1)}|\} < \varepsilon$ не выполняется, то производится переход к пункту 5.

Процедура обучения метода кластеризации реализуется посредством нейронной сети, которая представляет пятислойную структуру без обратных связей с весовыми коэффициентами и функциями активации (рис. 2). В качестве основы выбрана модель адаптивного типа Такаги – Сугено – Канга (TSK) [21]. Выходной сигнал определяется функцией агрегирования для M правил и N переменных (в нашем случае на входе сети $N = 9$ характеристик пакетов):

$$y(x) = \frac{\sum_{k=1}^M (w_k * y_k(x))}{\sum_{k=1}^M (w_k)}, \quad (4)$$

где $y_k(x) = z_{k0} \sum_{j=1}^N (z_{kj} x_j)$ – i -й полиномиальный компонент аппроксимации, веса w_i представляют степень выполнения условий правила $w_k = \mu_A^{(k)}(x_j)$.

Функция принадлежности или фуззификации $\mu_A^{(k)}$ для переменной x_j представляется функцией Гаусса

$$w_k = \mu_A^{(k)}(x_j) = \prod_{j=1}^N \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{(x_j - c_j^{(k)})}{\sigma_j^{(k)}} \right)^{2b_j^{(k)}}} \right], \quad (5)$$

где k – количество функций принадлежности ($k = 1 \dots M$); j – количество переменных ($N = 9$); $c_j^{(k)}, \sigma_j^{(k)}, b_j^{(k)}$ – параметры функции Гаусса, определяющие ее центр, ширину и форму k -й функции принадлежности j -й переменной.

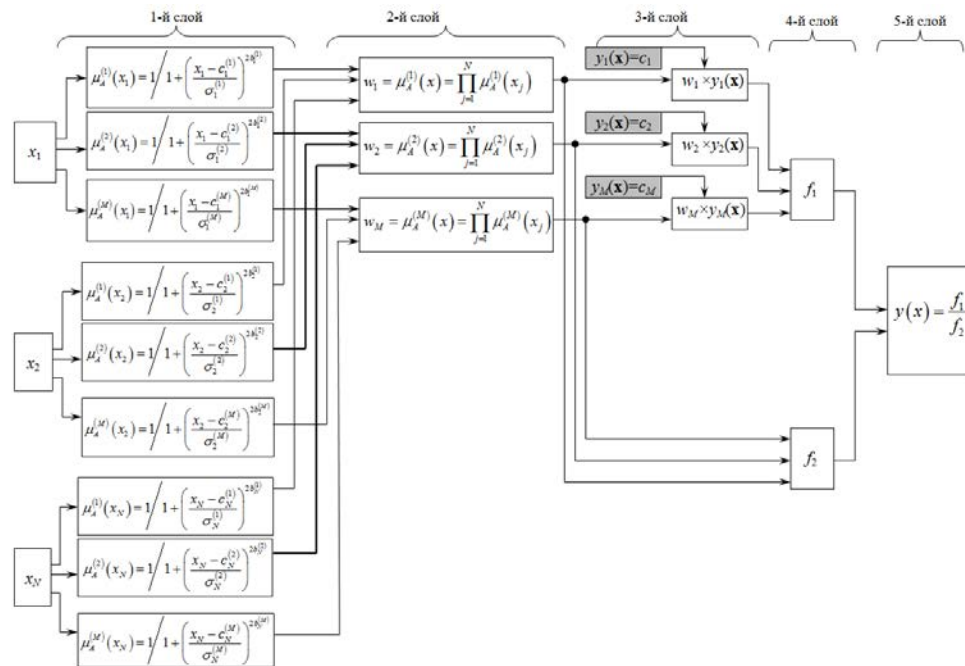


Рис. 2. Архитектура нечеткой нейронной сети для кластеризации пакетов сетевого трафика

Правила вывода выходных переменных $Y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$ для множества переменных $X = (x_1, x_2, \dots, x_9)$, принимающих множество значений $A_j^{(k)}$, представляет матрицу значений функций принадлежности размера $9 \times M$:

$$R_1: \text{если } x_1^{(1)} \in A_1^{(1)} \text{ и } x_2^{(1)} \in A_2^{(1)} \text{ и, ..., и } x_9^{(1)} \in A_9^{(1)}, \text{ то } y_1(x) = z_{10} \sum_{j=1}^9 (z_{1j} x_j),$$

$$\dots \dots \dots \dots$$

$$R_M: \text{если } x_1^{(M)} \in A_1^{(M)} \text{ и } x_2^{(M)} \in A_2^{(M)} \text{ и, ..., и } x_9^{(M)} \in A_9^{(M)}, \text{ то } y_M(x) = z_{M0} \sum_{j=1}^9 (z_{Mj} x_j).$$

Для снижения вычислительной сложности допустим, что количество правил совпадает с количеством функций принадлежности, хотя они могут отличаться.

В первом слое осуществляется фуззификация согласно формуле (5) для каждой переменной x_i . При этом для каждого правила R_j определяются значения функции принадлежности $\mu_A^{(k)}(x_i)$:

$$\mu_A^{(k)}(x_j) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_j - c_i^{(k)}}{\sigma_i^{(k)}} \right)^{2b_i^{(k)}}}. \quad (7)$$

Во втором слое определяются коэффициенты $w_k = \mu_A^{(k)}(x)$ путем агрегирования значений переменных x_i . Коэффициенты w_k передаются в 3-й слой, где умножаются на значения $y_i(x)$, а также в четвертый слой для вычисления суммы весов.

На третьем слое рассчитываются значения $y_i(x) = z_{k0} \sum_{j=1}^N (z_{kj} * x_j)$, которые умножаются на весовые коэффициенты w_k . Линейные параметры z_{k0} и z_{kj} являются функциями следствий правил, а z_{k0} рассматривается как центр функции принадлежности.

Четвертый слой представлен двумя нейронами (f_1 и f_2), выполняющими агрегирование результатов:

$$f_1 = \sum_{k=1}^M w_k y_k(x) = \sum_{k=1}^M \left[\left(\prod_{j=1}^N \mu_A^{(k)}(x_j) \right) c_k \right], \quad (8)$$

$$f_2 = \sum_{k=1}^M w_k = \sum_{k=1}^M \left[\prod_{j=1}^N \mu_A^{(k)}(x_j) \right]. \quad (9)$$

Пятый нормализующий слой представлен одним нейроном, где веса подвергаются нормализации и вычисляется выходная функция:

$$y(x) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sum_{k=1}^M w_k \times y_k(x)}{\sum_{k=1}^M w_k} = \frac{\sum_{k=1}^M \left[\left(\prod_{j=1}^N \mu_A^{(k)}(x_j) \right) \cdot c_k \right]}{\sum_{k=1}^M \left[\prod_{j=1}^N \mu_A^{(k)}(x_j) \right]}. \quad (10)$$

Значения параметров для первого и третьего слоя подбираются на этапе обучения. Параметры первого слоя $c_j^{(k)}, \sigma_j^{(k)}, b_j^{(k)}$ считаются нелинейными, а параметры третьего слоя z_{kj} – линейными. Обучение выполняется в два шага. На первом шаге подбираются параметры функций принадлежности третьего слоя посредством фиксации отдельных значений параметров и решения системы линейных уравнений

$$y(x) = \sum_{k=1}^M w_k (z_{k0} + \sum_{j=1}^N (z_{kj} x_j)). \quad (11)$$

Выходные переменные заменяются эталонными значениями d_P (P – число обучающих выборок). Систему уравнений можно записать в матричном виде: $D_P = W * Z$. Решение системы уравнений находится посредством

псевдоинверсной матрицы W^+ : $Z = W^+ D_P$. Далее после фиксации значений линейных параметров z_{kj} рассчитывается вектор Y фактических выходных переменных и определяется вектор ошибки $E = Y - D_P$.

На втором шаге ошибки направляются в обратном направлении до первого слоя, где рассчитываются параметры вектора градиента целевой функции принадлежности относительно параметров $c_j^{(k)}, \sigma_j^{(k)}, b_j^{(k)}$. Затем выполняется корректировка параметров функций принадлежности методом быстрого спуска по градиентному методу:

$$c_j^{(k)}(n+1) = c_j^{(k)}(n) - \eta \frac{\partial E(n)}{\partial c_j^{(k)}}, \quad (12)$$

$$\sigma_j^{(k)}(n+1) = \sigma_j^{(k)}(n) - \eta \frac{\partial E(n)}{\partial \sigma_j^{(k)}}, \quad (13)$$

$$b_j^{(k)}(n+1) = b_j^{(k)}(n) - \eta \frac{\partial E(n)}{\partial b_j^{(k)}}, \quad (14)$$

где n – номер итерации; η – параметр скорости обучения.

После уточнения нелинейных параметров снова запускается процесс адаптации линейных и нелинейных параметров. Итерационный процесс повторяется, пока не стабилизируются все параметры процесса.

Для оценки вероятностной принадлежности пакета данных к кластерам нормальных и нетипичных пакетов применяется распределение степени принадлежности по трем интервалам:

- а) 0–33 (%);
- б) 34–66 (%);
- в) 67–100 (%).

Решение о синтезе правил фильтрации принимается при попадании пакета в третий интервал. Такой пакет считается нетипичным, источник идентифицируется как скомпрометированный узел и его адрес добавляется в исключяющее правило таблицы потоков. Если пакет попадает в первый интервал, то он считается нормальным. Создается правило для ретрансляции пакетов с аналогичными наборами характеристик и адрес источника добавляется в белый список. Попадание пакета во второй интервал означает, что его степень близости к кластерам нормальных и нетипичных пакетов под вопросом. Точка, соответствующая вектору признаков такого пакета, становится центроидом нового кластера. Число кластеров увеличивается на единицу, и повторно решается задача кластеризации. Результатом интеллектуального анализа пакетов данных является синтез правил их фильтрации/ретрансляции в коммутаторах, включение адресов источников в белый или черный списки, добавление записей в журнал событий безопасности, которые включают идентификатор скомпрометированного узла, IP-адрес, время обнаружения атаки, время фиксации события, тип транзакции и т.д.

Результаты

Разработана подсистема интеллектуального анализа и кластеризации, которая включает модули валидации сетевых узлов, фильтрации трафика,

журнализации, парсер и анализатор пакетов на базе нечеткой логики и нейронной сети, входящая в состав системы защищенного мониторинга критических событий в дорожно-транспортной инфраструктуре (рис. 3).

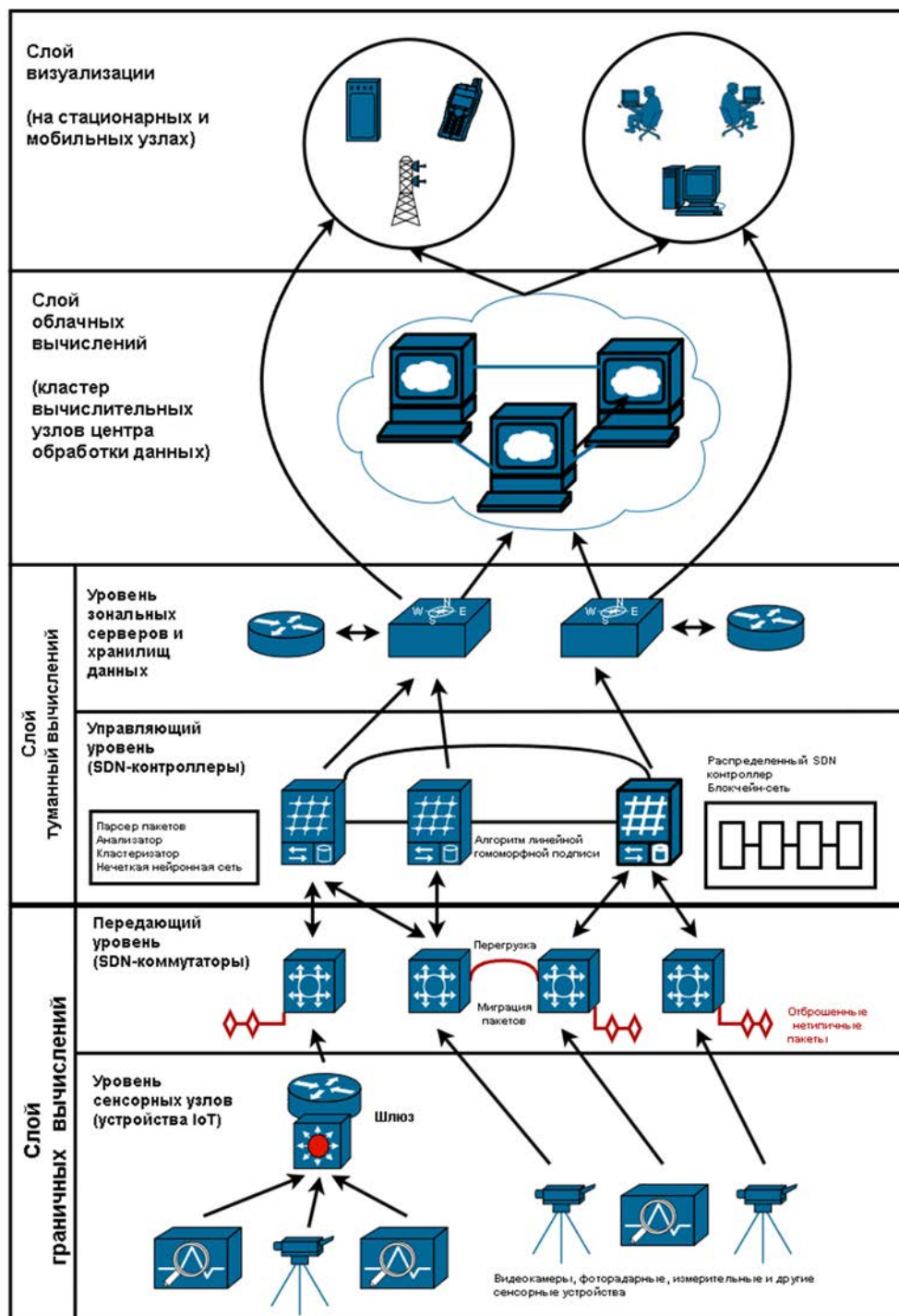


Рис. 3. Архитектура защищенной системы мониторинга

Система включает четыре слоя с шестью уровнями управления данными:

1) слой граничных вычислений, включающий уровень окончательных сенсорных узлов, маршрутизаторов, координаторов сенсорных сетей и уровень данных в SDN-коммутаторах. В слое реализуются процессы сбора, обработки и хранения телеметрических показателей работы оборудования и сенсорных данных, а функция ретрансляции/фильтрация пакетов в SDN-коммутаторах согласно правилам таблиц потоков;

2) слой туманных вычислений, включающий уровень зональных серверов и уровень управления в SDN-контроллерах. Слой реализует процедуры синтеза правил таблиц потоков, валидации цифровой подписи сетевых узлов, анализа и фильтрации сетевого трафика, обнаружения нетипичных пакетов на основе анализа заголовков и кластеризации, обучения нейронной сети, журналирования. В зональных серверах выполняются функции консолидации данных, агрегирования и хранения данных на основе технологии распределенной хеш-таблицы (Distributed Hash Table, DHT), так как основная часть данных является фотографиями или видеороликами с места инцидента, что решает проблему масштабируемости хранилища;

3) слой облачных вычислений на серверах центра обработки данных, который реализует основной функционал системы мониторинга по обработке и предиктивному анализу данных, централизованному хранению результатов;

4) слой визуализации предназначен для представления результатов мониторинга на мобильных и стационарных пользовательских устройствах.

Моделирование работы сетевой архитектуры системы мониторинга выполнено в системе Network Simulator версии 3 (NS3) [22, 23]. Для оценки эффективности анализа пакетов создано несколько неавторизованных узлов, которые генерируют нетипичные пакеты. Результатом моделирования являются оценки показателей работы архитектуры, такие как задержка передачи, время реакции, пропускная способность и точность распознавания пакетов. Оценка роста задержки передачи проведена в зависимости от увеличения числа сенсорных узлов и количества обрабатываемых пакетов (рис. 4).

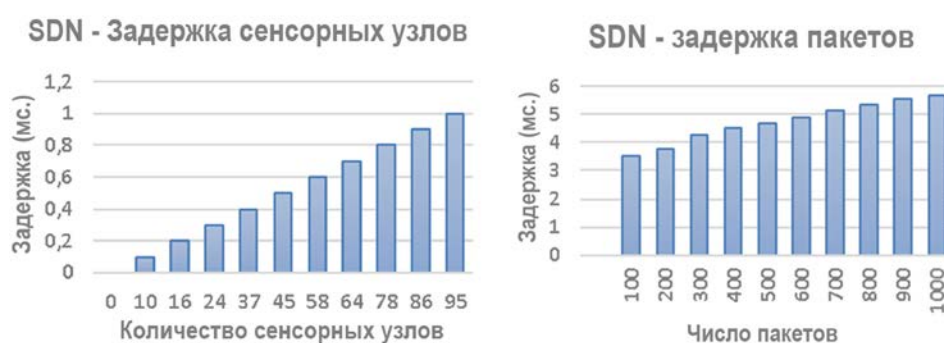


Рис. 4. Диаграммы зависимости задержки от числа сенсорных узлов и числа пакетов

Графики показывают, что величина задержки увеличивается по мере увеличения количества устройств с изменениями нескольких миллисекунд после передачи пакета от конечного узла. Однако при увеличении числа узлов

задержка становится существенной, так как наблюдается линейная зависимость.

Время реакции определяется на основе запросов, поступивших от конечных узлов к шлюзу, которые передаются на коммутаторы, где выполняется их ретрансляция или фильтрация после анализа пакетов. Сравнение времени реакции в предлагаемой архитектуре со временем реакции в традиционной архитектуре без анализа и кластеризации показало увеличение задержки в среднем на 10,5 % (рис. 5).

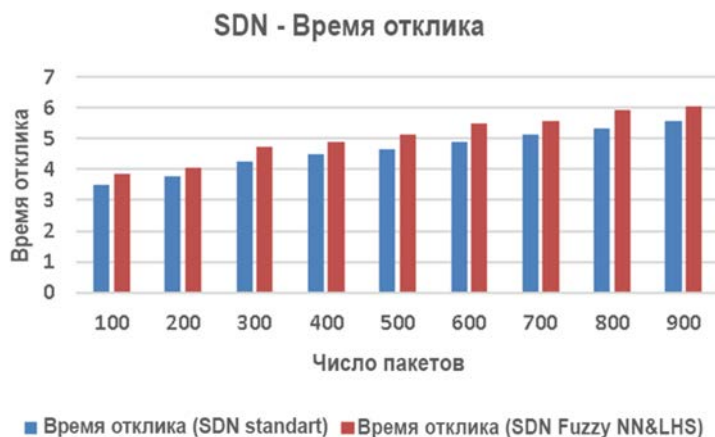


Рис. 5. Сравнение времени реакции сети с традиционной SDN-архитектурой и сети с подсистемой анализа и кластеризации

На рис. 6 приводятся диаграммы изменения пропускной способности в зависимости от числа запросов к узлам сети. Снижение пропускной способности в среднем до 16 % в предлагаемой архитектуре происходит из-за затрат времени на анализ, распознавание и кластеризацию пакетов.

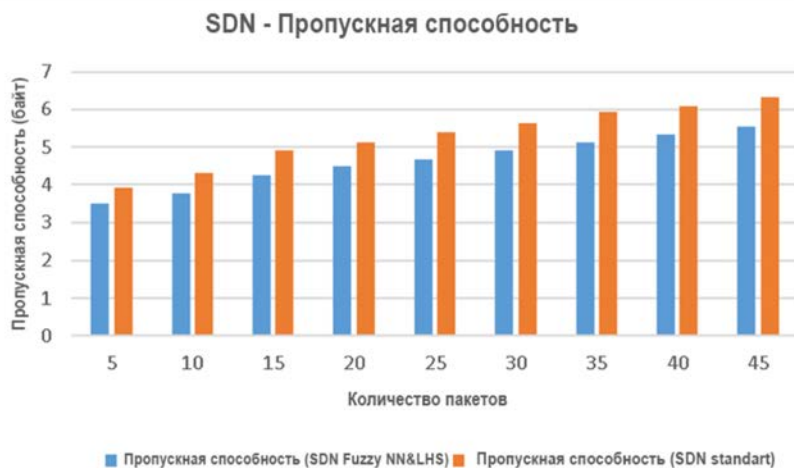


Рис. 6. Сравнение пропускной способности в сетях с традиционной и предлагаемой архитектурой

Для оценки эффективности предлагаемого подхода используется оценка точности распознавания нетипичных пакетов. В табл. 1 показана точность обнаружения нетипичных пакетов в зависимости от скорости поступления коммутаторов. Точность обнаружения достаточно высока, но снижается по мере роста скорости поступления пакетов, что обусловлено временем анализа пакетов и синтеза правил таблиц потоков.

Таблица 1

Точность обнаружения нетипичных пакетов

Поступающие на обработку пакеты (пакет/сек)	Общее число пакетов		Число пакетов в результате кластеризации		Точность распознавания (%)
	Нормальные пакеты	Нетипичные пакеты	Нормальные пакеты	Нетипичные пакеты	
20	400	75	399	76	98,68
40	800	150	797	153	98,03
60	1200	225	1195	230	97,82
80	1600	300	1590	310	96,77
100	2000	375	1980	395	94,94

Обсуждение

Развитие технологий IoT, распределенного реестра и программно-конфигурируемых сетей привело росту исследований в направлении их интеграции. В статье представлена архитектура защищенной системы распределенного мониторинга, реализующая технологию интеллектуального управления трафиком. Аналогичная архитектура рассматривается в статье [25], основным отличием которой является трехуровневая модель транспортной среды, включающей уровень коммутаторов, контроллеров и облачный уровень для реализации технологии блокчейн для защиты блоков данных. В нашей архитектуре технология хранения блоков данных в виде распределенного реестра реализована на зональных серверах туманного слоя. Задачи фильтрации трафика, валидации узлов, анализа и распознавания пакетов решаются на уровне коммутаторов краевого слоя и уровне контроллеров туманного слоя обработки данных. Интеграция зональных серверов и SDN-контроллеров на туманном слое вычислений позволяет перераспределить нагрузку для масштабирования, а также разделить процессы защиты данных от их обработки и хранения. Сервера облачного слоя решают задачи статистического и предиктивного анализа консолидированных сенсорных данных после их предварительной обработки и агрегирования на зональных серверах.

Другим примером синтеза защищенной транспортной среды для мониторинга дорожной инфраструктуры являются результаты исследований в работе [24]. Здесь рассмотрены вопросы синтеза системы связи автомобильных контроллеров и блоков управления. Авторы предлагают использовать технологию SDN-сети с блокчейном для обеспечения конфиденциальности данных производителей и владельцев автотранспорта с целью обнаружения несанкционированного доступа к системе управления автомобилем. Авторы статьи [6] исследуют преимущества интеграции блокчейна и SDN в одноранговых сетях IoT на основе предложенного протокола маршрутизации с решением задачи

кластеризации узлов для оптимизации энергопотребления. В работе [7] авторы предлагают децентрализованную архитектуру SDN-сети на основе блокчейна для «умного» города, которая предназначена для сбора данных и защиты от киберугроз. В нашем случае архитектура защищенной системы мониторинга разработана для применения в дорожно-транспортной инфраструктуре. Преимуществом предлагаемого подхода является комбинированный метод анализа пакетов атак на основе пятислойной нейронной сети с технологией глубокого обучения и методики оценки вероятностной принадлежности пакетов к нормальным и нетипичным блокам на основе нечеткой логики.

Для решения проблемы уязвимости при передаче данных между плоскостью управления и плоскостью данных архитектуры SDN-сети в работе [25] предлагается использование стороннего сервиса для проверки потоков за вознаграждение. Однако данный подход не может применяться для обеспечения безопасности в системах «Безопасный город» и «Безопасная дорога». Во-первых, это увеличивает стоимость услуг, во-вторых, делегирует ответственность за проблемы с безопасностью третьим лицам и, в-третьих, усложняет и замедляет процесс обнаружения киберугроз [26, 27]. В статье [28] для решения проблемы безопасного доступа авторы предлагают в качестве механизма авторизации использовать блокчейн и атрибутивное шифрование, что увеличивает время реакции системы. В нашем случае преимуществом является снижение вычислительной нагрузки на контроллеры за счет трехступенчатой технологии анализа сетевого трафика. На первом этапе выполняется фильтрация трафика по номерам портов. На втором этапе подтверждается подлинность источников данных и устройств доступа с целью фильтрации трафика от недопустимых узлов из «черного» списка. На третий этап, где выполняются затратные по времени процедуры анализа и распознавания, допускается ограниченное число отфильтрованных пакетов.

Основной проблемой большинства традиционных сенсорных сетей являются ограничения по пропускной способности каналов связи и вычислительным ресурсам сенсорных узлов [29]. Ограничения не позволяют решать задачи большой вычислительной сложности по использованию технологий блокчейна для обеспечения безопасности непосредственно на сенсорных узлах. В системе мониторинга дорожно-транспортной инфраструктуры сенсорными узлами являются фоторадарные комплексы и камеры видеонаблюдения, работающие в рамках стандартов беспроводных сетей WiFi, WiGi (802.11) и мобильных сетей 4G с каналами связи достаточно высокой пропускной способности. В связи с этим особых ограничений, связанных с пропускной способностью каналов передачи данных в предложенной архитектуре, практически нет. Для решения проблемы ресурсных ограничений основные вычислительные задачи решаются на уровне зональных и облачных серверов. Еще одна проблема связана с масштабируемостью программно-конфигурируемой сети [11]. Она возникает при централизации в SDN-контроллере процессов управления трафиком и усиливается при добавлении новых функций валидации узлов, анализа трафика и кластеризации пакетов. Способом решения проблемы является использование нескольких контроллеров с гипервизором для балансировки трафика и перераспределения пакетов, поступающих для анализа и обнаружения атак.

Заключение

В ходе исследований синтезирована безопасная архитектура системы дорожно-транспортного мониторинга с использованием технологии SDN-сетей, распределенного реестра, анализа и кластеризации пакетов данных с использованием нечеткой нейронной сети. В работе представлен ряд результатов:

- а) SDN-архитектура системы с четырьмя слоями устройств и шестью уровнями управления данными;
- б) метод обнаружения кибератак с использованием нечеткой нейронной сети и алгоритма кластеризации для оценки пакетов по девяти характеристикам;
- в) набор характеристик пакетов данных для распознавания и вероятностной оценки вредоносных пакетов.

Моделирование и оценка эффективности предложенного подхода показала достаточно высокую скорость обработки трафика в системе мониторинга. Для снижения вычислительной нагрузки реализована трехступенчатая технология анализа. На первом этапе выполняется фильтрация недопустимого трафика по номерам портов. На втором этапе подтверждается подлинность источников данных и устройств доступа и фильтруется трафик от недопустимых узлов. На третьем этапе выполняются процедуры машинного обучения и интеллектуального анализа отфильтрованных пакетов.

Список литературы

1. Finogeev A., Finogeev A. Information attacks and security in wireless sensor networks of industrial SCADA systems // Journal of Industrial Information Integration. 2017. Vol. 5. P. 6–16. doi: 10.1016/j.jii.2017.02.002
2. Zaman S., Alhazmi K., Aseeri M. A. [et al.]. Security Threats and Artificial Intelligence Based Countermeasures for Internet of Things Networks: A Comprehensive Survey // Access IEEE. 2021. Vol. 9. P. 94668–94690.
3. Contia M., Dehghantanhab A., Frankec K., Watson S. Internet of Things security and forensics: Challenges and opportunities // Future Generation Computer Systems. 2018. Vol. 78, part 2. P. 544–546.
4. Finogeev A., Finogeev A., Shevchenko S. Monitoring of Road Transport Infrastructure for the Intelligent Environment «Smart Road», Communications // Computer and Information Science. 2017. Vol. 754. P. 655–668. doi: 10.1007/978-3-319-65551-2_47
5. Finogeev A., Deev M., Finogeev A., Kolesnikoff I. Proactive Big Data Analysis for Traffic Accident Prediction // Proceeding of the 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA). 2020. doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371796
6. Latif S. A., Wen F. B. X., Iwendi C. [et al.]. AI-empowered, blockchain and SDN integrated security architecture for IoT network of cyber physical systems // Computer Communication. 2022. Vol. 181. P. 274–283.
7. Islam Md., Rahman A., Kabir S. [et al.]. Blockchain-SDN based Energy-Aware and Distributed Secure Architecture for IoTs in Smart Cities // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 9. P. 3850–3864. doi: 10.1109/JIOT.2021.3100797
8. Mousavi S. M. Early Detection of DDoS Attacks in Software Defined Networks Controller. Ontario : Carleton University Ottawa, 2014.
9. Yan Q., Yu F. R. Distributed denial of service attacks in software-defined networking with cloud computing // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53, iss. 4. P. 52–59.
10. Zhu L., Karim Md. M., Sharif K. [et al.]. SDN Controllers // ACM Computing Surveys. 2021. Vol. 53. P. 1.

11. Hassas Y. S., Tootoonchian A., Ganjali Y. On scalability of software-defined networking // *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol. 51. P. 136–141.
12. Valdovinos I. A., Pérez-Díaz J. A., Choo K.-K. R., Botero J. F. Emerging DDoS attack detection and mitigation strategies in software-defined networks: Taxonomy challenges and future directions // *Journal of Network and Computer Applications*. 2021. Vol. 187. P. 103093.
13. Alam I., Sharif K., Li F. [et al.]. A Survey of Network Virtualization Techniques for Internet of Things Using SDN and NFV // *ACM Computing Surveys*. 2021. Vol. 53. P. 1.
14. Bawany N. Z., Shamsi J. A., Salah K. DDoS Attack Detection and Mitigation Using SDN: Methods, Practices, and Solutions // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2017. Vol. 42. P. 425–441. doi: 10.1007/s13369-017-2414-5
15. Mohamed M. B., Alofe O. M., Azad M. A. [et al.]. A comprehensive survey on secure software-defined network for the Internet of Things // *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2022. Vol. 33.
16. Giri N., Jaisinghani R., Kriplani R. [et al.]. Distributed Denial Of Service (DDoS) Mitigation in Software Defined Network using Blockchain // *IoT in Social Mobile Analytics and Cloud (I-SMAC)*. 2019. P. 673–678.
17. Lee C. H., Kim K.-H. Implementation of IoT system using block chain with authentication and data protection // *Proceedings of International Conference on Information Networking (ICOIN)*. 2018. P. 936–940.
18. Velmurugadass P., Dhanasekaran S., Shasi Anand S., Vasudevan V. Enhancing Blockchain security in cloud computing with IoT environment using ECIES and cryptography hash algorithm // *Materials Today : proceedings*. 2021. Vol. 37. P. 2653.
19. Jang J.-S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1993. Vol. 23, № 3. P. 665–685.
20. Khang T. D., Vuong N. D., Tran M.-K., Fowler M. Fuzzy C-Means Clustering Algorithm with Multiple Fuzzification Coefficients // *Algorithms*. 2020. Vol. 13. P. 158. doi: 10.3390/a13070158
21. Chang P. C., Liu C. H. A TSK Type Fuzzy Rule Based System for Stock Price Prediction // *Expert Systems with Applications*. 2008. Vol. 34, № 1. P. 135–144.
22. Network Simulator ns-3. URL: <https://www.nsnam.org/releases/ns-3-35/> (дата обращения: 12.05.2023).
23. Lavacca F. G., Salvo P., Ferranti L. [et al.]. Performance Evaluation of 5G Access Technologies and SDN Transport Network on an NS3 Simulator // *Computers*. 2020. Vol. 9. P. 43. doi: 10.3390/computers9020043
24. Aliyu I., Feliciano M. C., Van Engelenburg S. [et al.]. A Blockchain-Based Federated Forest for SDN-Enabled In-Vehicle Network Intrusion Detection System // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 102593–102608. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094365
25. Sharma P. K., Chen M.-Y., Park J. H. A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 115–124.
26. Finogeev A., Finogeev A., Fionova L. [et al.]. Intelligent monitoring system for smart road environment // *Journal of Industrial Information Integration*. 2019. Vol. 15. P. 15–20. doi: 10.1016/j.jii.2019.05.003
27. Finogeev A., Parygin D., Schevchenko S. [et al.]. Collection and Consolidation of Big Data for Proactive Monitoring of Critical Events at Infrastructure Facilities in an Urban Environment // *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science (CIT&DS) Communications in Computer and Information Science 2021* / ed. by A. G. Kravets, M. Shcherbakov, D. Parygin, P. P. Groumpos. Springer, Cham., 2021. Vol 1448. doi: 10.1007/978-3-030-87034-8_25
28. Gelenbe E., Domanska J., Czàchorski T. [et al.]. Security for Internet of Things: The Seriot project // *Proceedings of IEEE International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. 2018. P. 1–5.

29. Ren W., Sun Y., Luo H., Guizani M. SiLedger: A Blockchain and ABE-based Access Control for Applications in SDN-IoT Networks // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. Vol. 18. P. 4406–4419. doi: 10.1109/TNSM.2021.3093002

References

1. Finogeev A., Finogeev A. Information attacks and security in wireless sensor networks of industrial SCADA systems. *Journal of Industrial Information Integration*. 2017;5:6–16. doi: 10.1016/j.jii.2017.02.002
2. Zaman S., Alhazmi K., Aseeri M. A. et al. Security Threats and Artificial Intelligence Based Countermeasures for Internet of Things Networks: A Comprehensive Survey. *Access IEEE*. 2021;9:94668–94690.
3. Contia M., Dehghantanhab A., Frankec K., Watson S. Internet of Things security and forensics: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*. 2018;78(part 2):544–546.
4. Finogeev A., Finogeev A., Shevchenko S. Monitoring of Road Transport Infrastructure for the Intelligent Environment «Smart Road», Communications. *Computer and Information Science*. 2017;754:655–668. doi: 10.1007/978-3-319-65551-2_47
5. Finogeev A., Deev M., Finogeev A., Kolesnikoff I. Proactive Big Data Analysis for Traffic Accident Prediction. *Proceeding of the 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*. 2020. doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371796
6. Latif S. A., Wen F. B. X., Iwendi C. et al. AI-empowered, blockchain and SDN integrated security architecture for IoT network of cyber physical systems. *Computer Communication*. 2022;181:274–283.
7. Islam Md., Rahman A., Kabir S. et al. Blockchain-SDN based Energy-Aware and Distributed Secure Architecture for IoTs in Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021;9:3850–3864. doi: 10.1109/JIOT.2021.3100797
8. Mousavi S.M. *Early Detection of DDoS Attacks in Software Defined Networks Controller*. Ontario: Carleton University Ottawa, 2014.
9. Yan Q., Yu F.R. Distributed denial of service attacks in software-defined networking with cloud computing. *IEEE Communications Magazine*. 2015;53(4):52–59.
10. Zhu L., Karim Md. M., Sharif K. et al. SDN Controllers. *ACM Computing Surveys*. 2021;53:1.
11. Hassas Y.S., Tootoonchian A., Ganjali Y. On scalability of software-defined networking. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51:136–141.
12. Valdovinos I.A., Pérez-Díaz J.A., Choo K.-K.R., Botero J.F. Emerging DDoS attack detection and mitigation strategies in software-defined networks: Taxonomy challenges and future directions. *Journal of Network and Computer Applications*. 2021;187:103093.
13. Alam I., Sharif K., Li F. et al. A Survey of Network Virtualization Techniques for Internet of Things Using SDN and NFV. *ACM Computing Surveys*. 2021;53:1.
14. Bawany N.Z., Shamsi J.A., Salah K. DDoS Attack Detection and Mitigation Using SDN: Methods, Practices, and Solutions. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2017;42:425–441. doi: 10.1007/s13369-017-2414-5
15. Mohamed M.B., Alofe O.M., Azad M.A. et al. A comprehensive survey on secure software-defined network for the Internet of Things. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2022;33.
16. Giri N., Jaisinghani R., Kriplani R. et al. Distributed Denial Of Service (DDoS) Mitigation in Software Defined Network using Blockchain. *IoT in Social Mobile Analytics and Cloud (I-SMAC)*. 2019:673–678.
17. Lee C.H., Kim K.-H. Implementation of IoT system using block chain with authentication and data protection. *Proceedings of International Conference on Information Networking (ICOIN)*. 2018:936–940.

18. Velmurugadass P., Dhanasekaran S., Shasi Anand S., Vasudevan V. Enhancing Blockchain security in cloud computing with IoT environment using ECIES and cryptography hash algorithm. *Materials Today : proceedings*. 2021;37:2653.
19. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1993;23(3):665–685.
20. Khang T.D., Vuong N.D., Tran M.-K., Fowler M. Fuzzy C-Means Clustering Algorithm with Multiple Fuzzification Coefficients. *Algorithms*. 2020;13:158. doi: 10.3390/a13070158
21. Chang P.C., Liu C.H. A TSK Type Fuzzy Rule Based System for Stock Price Prediction. *Expert Systems with Applications*. 2008;34(1):135–144.
22. *Network Simulator ns-3*. Available at: <https://www.nsnam.org/releases/ns-3-35/> (accessed 12.05.2023).
23. Lavacca F.G., Salvo P., Ferranti L. et al. Performance Evaluation of 5G Access Technologies and SDN Transport Network on an NS3 Simulator. *Computers*. 2020;9:43. doi: 10.3390/computers9020043
24. Aliyu I., Feliciano M.C., Van Engelenburg S. et al. A Blockchain-Based Federated Forest for SDN-Enabled In-Vehicle Network Intrusion Detection System. *IEEE Access*. 2021;9:102593–102608. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094365
25. Sharma P.K., Chen M.-Y., Park J.H. A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT. *IEEE Access*. 2018;6:115–124.
26. Finogeev A., Finogeev A., Fionova L. et al. Intelligent monitoring system for smart road environment. *Journal of Industrial Information Integration*. 2019;15:15–20. doi: 10.1016/j.jii.2019.05.003
27. Finogeev A., Parygin D., Schevchenko S. et al. Collection and Consolidation of Big Data for Proactive Monitoring of Critical Events at Infrastructure Facilities in an Urban Environment. *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science (CIT&DS) Communications in Computer and Information Science 2021*. Springer, Cham., 2021;1448. doi: 10.1007/978-3-030-87034-8_25
28. Gelenbe E., Domanska J., Czàchorski T. et al. Security for Internet of Things: The Seriot project. *Proceedings of IEEE International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. 2018:1–5.
29. Ren W., Sun Y., Luo H., Guizani M. SiLedger: A Blockchain and ABE-based Access Control for Applications in SDN-IoT Networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021;18:4406–4419. doi: 10.1109/TNSM.2021.3093002

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Алексеевич Финогеев

кандидат технических наук,
доцент кафедры систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: fanton3@yandex.ru

Anton A. Finogeev

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of computer-aided design systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 24.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 20.06.2023

Принята к публикации/Accepted 04.07.2023

СЛОЖНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ МОДЕЛИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ

М. И. Кревский¹, А. С. Бождай²

¹ Государственное казенное учреждение «Информационный город», Москва, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ westhemer1@gmail.com, ² bozhday@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Оптимизация бизнес-процессов является актуальной проблемой в управлении организационными системами. Рассматривается проблема построения векторных моделей бизнес-процессов, позволяющих эффективно анализировать данные протоколов информационных систем о ходе выполнения организационных задач методами машинного обучения. Цель работы состоит в исследовании вопросов анализа и оптимизации бизнес-процессов на основе векторного представления основных ресурсных параметров организационных процессов. Применение методов машинного обучения и технологии Process Mining позволит эффективно решать задачи классификации бизнес-процессов с точки зрения их предметного содержания, сложности и трудоемкости. *Материалы и методы.* Используются методы анализа бизнес-процессов на основе протоколов информационных систем (Process Mining), методы классического машинного обучения и нейросетевые технологии, методы управления организационными системами. *Результаты.* В ходе работы выполнен обзор существующих методов создания векторных моделей документов из сфер обработки естественного языка и графов, оценена их применимость к созданию векторов-эмбедингов бизнес-процессов. Проведен эксперимент по сравнению эффективности применения методов Bag-of-words, Tf-idf, Trace2vec, Graph2vec в задаче векторизации. *Выводы.* Итоги экспериментов показали эффективность метода trace2vec для процессов малой и средней длины и метода graph2vec для процессов большой длины.

Ключевые слова: векторное представление процесса, методы векторизации, анализ бизнес-процессов, машинное обучение, process mining, анализ графов, нейронная сеть

Для цитирования: Кревский М. И., Бождай А. С. Сложные векторные модели бизнес-процессов в задаче классификации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 142–154. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-10

COMPLEX EMBEDDINGS OF BUSINESS PROCESSES IN THE CLASSIFICATION PROBLEM

M.I. Krevskiy¹, A.S. Bozhday²

¹ State government institution "Info City", Moscow, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹ westhemer1@gmail.com, ² bozhday@yandex.ru

Abstract. *Background.* Optimization of business processes is an important problem in the management of organizational systems. The article is dedicated to the problem of creating

business processes' embeddings that allow to efficiently analyze the logs of information system on the progress of organizational tasks by machine learning methods. The purpose of the work is to study the analysis and optimization of business processes, based on a vector representation of the main parameters of organizational processes. The application of machine learning methods and process mining will efficiently solve the problems of classifying business processes considering their content, complexity and labor intensity. *Materials and methods.* Business process analysis methods based on information systems logs (process mining), classical machine learning methods and neural network technologies, organizational systems management methods are used. *Results.* In the course of the work, an overview of existing methods for creating document embeddings from the natural language processing and graphs analysis was carried out, their applicability to the creation of embedding vectors of business processes was evaluated. A number of experiments have been conducted to compare the effectiveness of using Bag-of-words, Tf-idf, Trace2vec, Graph2vec methods in the vectorization problem. *Conclusions.* The results of the experiments showed the effectiveness of the trace2vec method for short and medium-length processes and the graph2vec method for long-length processes.

Keywords: vector representation of the process, vectorization methods, analysis of business process, machine learning, process mining, graph analysis, neural network

For citation: Krevskiy M.I., Bozhday A.S. Complex embeddings of business processes in the classification problem. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):142–154. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-10

Введение

Процессы глобальной цифровизации стали одним из ключевых факторов повышения эффективности процессов управления организационными системами в XXI в. Ежедневно в журналах событий информационных систем сохраняются огромные объемы данных. Как эффективный подход к интеллектуальному анализу журналов событий зарекомендовала себя технология *process mining*, являющаяся одним из направлений науки о данных. Сочетание приемов классического *process mining* и машинного обучения позволяет значительно расширить инструментарий для анализа процессов, находить новые закономерности и автоматизировать составление аналитических отчетов.

Существует два противоположных подхода к анализу процессов [1]: первый, основанный на формальном регламенте, описывающем идеальный процесс, и второй, основанный на реальном, отраженном в данных поведении системы. *Process mining* – это технология, использующая для анализа данные реальных журналов событий информационных систем. Модели машинного обучения способны принимать на вход только математические объекты, поэтому важным этапом подготовки данных для машинного обучения является векторизация – преобразование объектов из очищенных данных в векторные представления. При этом, с одной стороны, важно вместить как можно больше ценной информации об объекте, а с другой стороны – затраты памяти и вычислительных мощностей на генерацию векторов должны быть минимизированы.

В наиболее продвинутых сферах машинного обучения – обработке естественных языков и компьютерном зрении – задача построения сложных векторных представлений глубоко изучена и хорошо освещена [2, 3]. Связка машинного обучения и *process mining* не менее важна для общества и бизнеса, но получила значительно меньше внимания, поэтому остро стоит вопрос

определения наиболее удачных для конкретной задачи методов построения векторных представлений процессов. Данная статья посвящена исследованию существующих подходов к созданию векторов процессов в рамках технологии *process mining* с применением методов машинного обучения. Для выполнения сравнительного анализа их эффективности в задачах векторизации и классификации бизнес-процессов проведен эксперимент на обезличенных данных журналов событий оказания государственных услуг портала *mos.ru* [4].

Классические методы векторизации

Тривиальным способом получения машиночитаемого представления последовательности активностей является *bag of words*, заимствованный из сферы обработки естественного языка. Метод заключается в формировании для каждого процесса словаря из всех уникальных активностей журнала событий. Каждой активности ставится в соответствие подсчитанное число встреч этой активности в процессе. *Bag of words* отличается простотой и минимальным количеством вычислений, поэтому он хорошо подходит в качестве исходного уровня для сравнения.

Tf-idf – метод, позаимствованный из обработки естественных языков. Изначально *tf-idf* – это статистическая мера, показывающая важность слова в документе, но она без проблем переносится на область интеллектуального анализа процессов.

Term frequency (1) – это частота активности в процессе:

$$tf(t, d) = \frac{n_t}{\sum_k n_k}, \quad (1)$$

где n_t – количество вхождений активности t в процесс; $\sum_k n_k$ – общее количество всех активностей в процессе.

Inversed document frequency (2) – мера, обратная логарифму частоты вхождения активности в документы логга:

$$idf(t, D) = \log D \vee \frac{1}{\{d_i \in D | t \in d_i\} \vee}, \quad (2)$$

где t – активность; d_i – процесс под номером i ; D – множество активностей журнала событий.

Классический вариант векторизации сразу создает нормированный вектор. *Tf-idf* векторизация требует незначительно больше вычислений и времени, чем *Bag of words*, но значительно меньше, чем нейросетевые подходы. Метод так же, как и *bag of words*, не учитывает порядок активностей в цепочке и в полной мере смысл, но, по крайней мере, позволяет расставить акценты на наиболее «важных» активностях процесса.

Нейросетевые методы векторизации процессов из сферы обработки естественного языка

Такие свойства данных журналов событий, как последовательность с внутренней логикой и правилами, конечное число разных видов активностей и объединение активностей в группы – процессы, позволяют проследить

аналогию с естественным языком, где активность соответствует слову, процесс – предложению, а журнал событий – тексту.

Act2vec [5] – это нейросетевой контекстно-ориентированный метод векторизации слов, позволяющий получать векторы процессов заданной фиксированной длины. *Act2vec* является прямым переносом подхода векторизации слов *word2vec*, предложенного Томасом Миколовым в [6], на сферу анализа процессов.

Word2vec – метод контекстного представления слова. В его основе лежит гипотеза о том, что похожие по смыслу слова встречаются в похожих контекстах. Исходя из гипотезы, слово можно представить усредненным контекстом, в котором оно встречается. Для *word2vec* существует две [7] нейросетевые архитектуры: *Continuous Bag of words (CBOW)* и *Skip-gram*. Модели *CBOW* обучаются определять по контексту слово, которое в нем находится, а *Skip-gram* пытается предсказывать контекст по слову, которое в нем лежит.

Контекстом слова w_i в предложении w называются слова $w_{t-l}, w_{t-l+1}, \dots, w_{t-1}, w_{t+1}, \dots, w_{t+l-1}, w_{t+l}$, попавшие в окно с шириной, заданной гиперпараметром l . Применяющаяся для *word2vec* нейросеть является неглубокой, в ней присутствуют только входной, один скрытый и выходной слои. Далее будет подробнее рассмотрена архитектура *CBOW* [8], так как именно ее модификация для *doc2vec* использовалась в эксперименте.

На входной слой нейронной сети подаются полученные быстрой кодировкой [9] (*one-hot*) вектора слов размерностью $1 \times V$ (где V – размер словаря), лежащих в контексте предсказываемого слова. В зависимости от реализации входные векторы либо суммируются, либо конкатенируются. В описываемой реализации используется сложение входных векторов.

Размер скрытого слоя H является гиперпараметром. Во время обучения на этапе прямого распространения данные из входного слоя попадают в скрытый слой путем умножения на матрицу W_1 размерностью $V \times H$. Затем скрытый слой $H \times 1$ умножается на матрицу W_2 размерностью $H \times V$, результат попадает в выходной слой размерностью $1 \times V$.

Получившийся в выходном слое вектор сравнивается с *one-hot* вектором слова, находящегося в контексте, который пришел на вход. Далее выполняется обратное распространение ошибки, и изначально заполненные произвольными значениями матрицы W_1 и W_2 изменяются.

В *word2vec* обычно применяют метод *negative sampling* для сокращения времени обучения модели. *Negative sampling* позволяет сократить вычисления: вместо обновления всех весов матрицы на каждом шаге предлагается обновлять веса только для слов, входящих в контекст, и еще небольшого числа не входящих.

В результате такого обучения нейронная сеть способна предсказывать слово по контексту, в котором оно находится. Однако это не является целью создания сети. Практический смысл имеют только обученные матрицы W_1 и W_2 , в которых и содержатся V векторов длины H . Получившиеся векторы лежат в латентном векторном пространстве и являются отображениями усредненных контекстов, в которых слова находятся. Это позволяет не просто записать в вектор абстрактную обобщенную информацию, но и получить интересное свойство векторных представлений – смысловую векторную алгебру.

Trace2vec – это нейросетевой способ создания векторных представлений процессов. Он основан на подходе *doc2vec* из сферы обработки естественных языков, впервые представленном Томасом Миколовым в статье [10]. *Doc2vec* является логическим продолжением и расширением архитектур *word2vec*, позволяющим обучать не только векторы фиксированной размерности для отдельных слов, но и вектор целого текста любой длины.

Doc2vec аналогично *word2vec* имеет две архитектуры для получения вектора абзаца – это *distributed memory*, соответствующий CBOW, и *distributed bag of words*, соответствующий *skip-gram* [11].

В работе рассматривается архитектура *distributed memory*, дополненная вектором распределенной памяти абзаца, который обновляет свои значения в процессе обучения наравне с векторами слов. Каждый вектор абзаца подставляется на места дополнительных строчки и столбца матриц на время обучения на тексте соответствующего абзаца. Таким образом, обучаясь вместе со всеми векторами входящих в абзац слов, вектор самого абзаца накапливает в себе информацию.

Изначально смыслом контекстного представления *word2vec* был уход от переменной размерности разреженных, малоинформативных векторов быстрого (*one-hot*) кодирования к коротким, высокоинформативным векторам. Это позволяет сократить длину векторов слов с размера словаря до небольшого фиксированного, заданного гиперпараметром значения. В случае с интеллектуальным анализом процесса проблема размерности значительно менее актуальна.

Учитывая на порядок большие временные и вычислительные затраты на создание нейросетевых векторных представлений по сравнению с классическими, выбор в пользу более технологичной модели векторизации не дает настолько больших и однозначных преимуществ, как в случае обработки естественного языка. Наибольший смысл в применении *Trace2vec* лежит в скрытой, зашифрованной нейросетью в латентном пространстве информации о зависимостях и закономерностях между активностями и между процессами журнала событий.

Методы векторизации графов

Можно проследить сходство между журналом событий и ориентированным графом. Узлы соответствуют активностям, ребра – переходам между активностями. Веса ребер иногда хранят свойства совершенной активности, лежащей в вершине – начале ребра. Такой подход к рассмотрению графа позволяет применять широкий спектр классических алгоритмов на графах и методов машинного обучения для графов.

Graph2vec [12] является общим названием большого набора алгоритмов, создающих векторные представления для графов. Наиболее распространено применение *graph2vec* в анализе социальных сетей, разработке молекулярных структур в медицине и в графах знаний (*Knowledge graph*). Для создания векторов в основном применяют следующие подходы:

- сверточные, выполняющие поиск характерных подграфов графа подобно поиску элементов изображения в задачах компьютерного зрения [13];
- матричные, основанные на разложении и векторизации матрицы смежности графа [14];

– адаптированные для графов нейросетевые способы векторизации из области обработки естественных языков (*word2vec*, *doc2vec*) [15].

В работе рассматривается применение только алгоритма *deep walks* [16]. Он является методом создания векторных представлений из сферы обработки естественных языков, адаптированным для графов, и был выбран потому, что лучше всего подходит под специфику данных. *Deep walks* является одной из реализаций подхода *node2vec* [15]. *Node2vec* – это аналог *word2vec* для графов. Соответственно, предполагается, что по контексту (окружающим вершинам, с которыми есть ребра) можно предсказать вершину и наоборот; семантически похожие вершины лежат в похожих контекстах; вершина аналогична слову, а граф – абзацу.

Алгоритм *deep walks* работает в три шага (рис. 1).

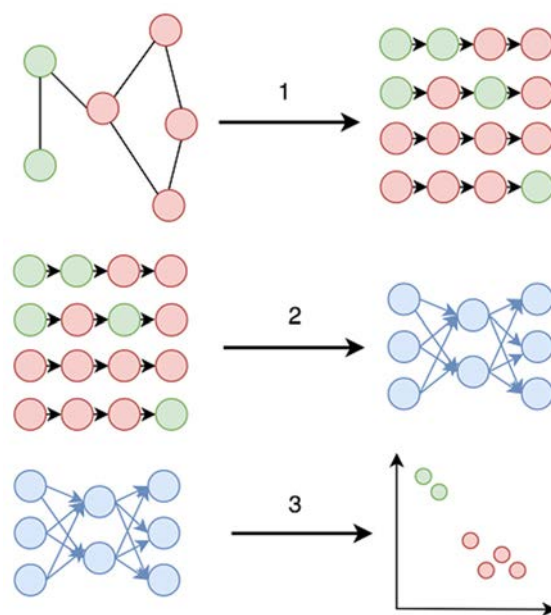


Рис. 1. Этапы работы алгоритма *deep walks* [16]

1. *Random walk*. На этом этапе происходит случайное семплирование маршрутов в графе. Из произвольно выбранной вершины итератор переходит в случайного соседа с вероятностью, пропорциональной весу ребра, затем аналогично переходит в соседа второй вершины, и так до тех пор, пока не будет достигнута верхняя граница длины маршрута, заданная в виде гиперпараметра. Первый этап призван преобразовать информацию о графе в вид, аналогичный фрагментам текстовых данных.

2. Обучение модифицированной нейронной сети *trace2vec* на семплированных маршрутах. Векторы отдельных активностей обучаются точно так же, как и в исходном варианте *trace2vec*. Отличие *deep walks* от стандартного *trace2vec* заключается в том, что если в *trace2vec* для каждой итерации цикла окно двигалось по всему процессу, то в *deep walks* окно движется по его семплированной части. Соответственно, вместо того чтобы обучать множество векторов отдельных маршрутов в графе, обучается единственный вектор

целого графа. И дополнительный столбец матрицы, зарезервированный под вектор графа, не учится заново каждый раз при переходе от одного маршрута к другому.

3. Извлечение векторных представлений. Получившийся в результате вектор графа извлекается из обученной матрицы, готовый к дальнейшему применению.

В результате получается набор контекстно-ориентированных векторов вершин, обученных по принципу *node2vec*, и вектор графа.

Результаты

Целью эксперимента являлось определение оптимального сочетания модели и ее параметров для получения векторного представления процесса в зависимости от свойств данных. Векторные представления, получившиеся в результате векторизации следов процессов с помощью *bag of words*, *tf-idf*, *trace2vec* и *graph2vec*, были подвергнуты сравнительному анализу. Главным критерием сравнения была выбрана способность вектора вмещать в себя информацию о внутреннем устройстве и особенностях процесса, позволяющая провести успешную классификацию процессов. Данные, используемые в работе, обезличены и взяты из базы данных московских государственных услуг. В качестве выборок для обучения использовалось пять журналов событий с данными по разным услугам. Журналы отличны между собой в размерах, средних длинах активностей, наборе встречающихся статусов, их порядке, понятии о корректности процесса и соотношении классов (табл. 1).

Таблица 1

Количественные свойства наборов данных в эксперименте

Свойство набора данных	Услуга 1	Услуга 2	Услуга 3	Услуга 4	Услуга 5
Количество активностей	22 854	345 048	724 319	422 911	2 370 892
Количество процессов	3147	50 752	119 338	86 571	149 295
Средняя длина активности	7,26	6,79	6,07	4,89	15,88
Кол-во уникальных активностей	12	13	17	9	25
Доля корректных процессов	0,93	0,71	0,97	0,94	0,96

В данной работе задачей для сравнения качества векторных представлений являлась бинарная классификация. Первый класс – это процессы в норме, второй – процессы с нарушениями. Классификация проводилась несколькими методами для того, чтобы оценивать именно векторизацию, а не классификаторы. Полезным для практики результатом было бы установить лучшую пару: метод векторизации и метод классификации. Будем использовать следующие бинарные классификаторы:

- 1) метод *k*-ближайших соседей (*KNN*);
- 2) случайный лес (*Random Forest*);
- 3) многослойный перцептрон (*Multi-Layered Perceptron*).

Как видно из табл. 1, в журналах событий классы сильно несбалансированы и доля корректных процессов далека от 50 %. Этот факт необходимо было учесть при обучении и подборе метрики качества для оценки результирующей классификации. Для того чтобы немного упростить себе задачу,

процент процессов с ошибками был увеличен путем семплирования и методом *bootstrap* для обучающей выборки.

Наборы данных были преобразованы в векторы следующими методами:

1. *Bag of words* с последующей нормализацией векторов.
2. *Tf-idf* векторизация.
3. *Trace2vec* с размерностями векторов 8, 16, 32.
4. *Graph2vec* с размерностями векторов 8, 16, 32.

В результате векторизации каждого из пяти журналов восемью способами получилось 40 результирующих наборов данных, хранящих векторные представления с разными свойствами. Эти наборы были подвергнуты классификации тремя способами. Результаты классификации были оценены метрикой *ROC-AUC*, описанной далее.

Метрика сравнения

В классификации существуют следующие варианты исхода предсказания принадлежности объекта к классу [17]: *True positive (TP)* – верно предсказано отношение объекта к классу; *False positive (FN)* – неверно предсказано отношение объекта к классу; *True negative (TN)* – верно предсказано отсутствие отношения объекта к классу; *False negative (FN)* – неверно предсказано отсутствие отношения объекта к классу.

Для оценки результатов работы применялась метрика *ROC-AUC Score* [18]. Данная метрика широко применяется для оценки бинарной классификации. *ROC* – *Receiver Operating Characteristics curve* – кривая, где на вертикальной оси откладывается мера *False positive rate* (она же *Recall*), а по горизонтальной – мера *True positive rate*:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} = Recall, \quad (3)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}. \quad (4)$$

ROC-AUC – *Area under curve* – это площадь под кривой *ROC* [19], показывающая качество классификатора. Значения метрики могут находиться в диапазоне от 0 до 1. Классификатор, который показал значение 1, считается идеальным. При значении *ROC-AUC*, равным 0,5, классификатор не предсказывает ничего, и ценность его нулевая. При значении площади под кривой, равном 0, классификатор всегда дает только неправильные ответы, т.е. если перед такими предсказаниями поставить знак отрицания, то снова получится идеальный классификатор.

Причина выбора метрики *ROC-AUC* заключается в ее способности эффективно оценивать классификацию даже при условии сильно несбалансированных данных. В работе была использована двухклассовая реализация метрики *sklearn.metrics.roc_auc_score* из библиотеки *scikit-learn*.

Обсуждение

В результате выполнения эксперимента со 120 комбинациями способов векторизации и классификации были измерены значения *ROC-AUC*. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица результатов экспериментов

		BOW	Tf-idf	Trace2vec			Graph2vec		
Журнал 1	Размер вектора	12	12	8	16	32	8	16	32
	KNN	0,523	0,552	0,611	0,679	0,658	0,615	0,648	0,689
	RF	0,602	0,654	0,811	0,822	0,841	0,796	0,806	0,778
	MLP	0,681	0,670	0,763	0,892	0,826	0,735	0,824	0,773
Журнал 2	Размер вектора	13	13	8	16	32	8	16	32
	KNN	0,690	0,709	0,673	0,690	0,653	0,638	0,644	0,682
	RF	0,729	0,740	0,783	0,870	0,816	0,777	0,771	0,778
	MLP	0,712	0,748	0,806	0,891	0,832	0,786	0,805	0,733
Журнал 3	Размер вектора	17	17	8	16	32	8	16	32
	KNN	0,612	0,669	0,726	0,779	0,738	0,596	0,703	0,636
	RF	0,621	0,668	0,845	0,887	0,893	0,762	0,749	0,744
	MLP	0,624	0,752	0,822	0,861	0,836	0,782	0,813	0,718
Журнал 4	Размер вектора	9	9	8	16	32	8	16	32
	KNN	0,512	0,593	0,638	0,708	0,652	0,565	0,662	0,619
	RF	0,617	0,678	0,749	0,789	0,789	0,636	0,694	0,687
	MLP	0,718	0,719	0,785	0,836	0,796	0,647	0,686	0,639
Журнал 5	Размер вектора	25	25	8	16	32	8	16	32
	KNN	0,562	0,646	0,714	0,706	0,703	0,810	0,824	0,832
	RF	0,670	0,714	0,786	0,815	0,857	0,891	0,881	0,904
	MLP	0,699	0,705	0,820	0,826	0,865	0,882	0,851	0,903

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующие выводы:

1. *KNN* как метод классификации показал себя наихудшим образом. Даже хорошо составленные векторные представления, давшие высокий результат по метрике с другими классификаторами, в связке с *KNN* получили низкую оценку.

2. Случайный лес и многослойный перцептрон проявили себя схожим образом, оценки их работы близки. Для разных результатов векторизации оба классификатора равновероятно могут дать наивысшую оценку.

3. Нормализованный *bag of words* показал наихудшие результаты из рассмотренных методов векторизации. На некоторых данных *ROC-AUC* метода сравнима с метрикой *tf-idf* векторизатора, но в среднем векторизация *bag of words* оказалась хуже в рамках эксперимента.

4. Векторизатор *tf-idf* оказался лучшим из классических методов. В сравнении с нейросетевыми векторными представлениями векторы *tf-idf* стабильно проигрывают в применимости к поставленной задаче.

5. *Trace2vec* получил хорошие оценки (больше 0,75, в большинстве случаев – больше 0,8) на всех журналах событий и при разных средних длинах процессов (если не использовать метод классификации *KNN*). Хуже всего метод проявил себя на журнале 4 с самой короткой средней длиной активности, равной 4,89. В журнале 1 с 22 854 активностями хватило данных для обучения модели. Наивысший результат показал вариант *trace2vec* с длиной вектора, равной 16.

6. Метод *graph2vec* проявил заметную зависимость от данных. На журнале событий 4 с короткой средней длиной активности метод получил довольно низкие оценки независимо от метода классификации. На журнале 5 с большой средней длиной активности, равной 15,88, метод показал себя наилучшим образом и получил по метрике *ROC-AUC* оценку выше, чем *trace2vec*. Для средних длин активностей размерность вектора, равная 16, показала лучшие результаты, но на длинных процессах вектор размерностью 32 оказался предпочтительнее.

Заключение

Анализ результатов эксперимента показал, что наилучшим универсальным способом получения векторных представлений процессов оказался метод *trace2vec* с размерностью вектора, равной 16. Для больших процессов, включающих длинные цепочки активностей, лучше подойдет метод *graph2vec* с длиной вектора, равной 32.

В работе показано, что в целях оптимизации управления организационными системами бизнес-процессы можно эффективно преобразовывать в векторный вид для задач классификации. На данный момент результаты работы активно используются отделом мониторинга и анализа государственных услуг ГКУ «Инфогород» для классификации процессов оказания государственных услуг в системе интеллектуального анализа процессов «Нерв» [20]. В будущем планируется исследовать вопросы предиктивного анализа бизнес-процессов и создать предсказательную модель машинного обучения. Предлагается, чтобы модель на основе векторного представления первой половины процесса предсказывала последующие активности и срок завершения процесса.

Список литературы

1. Mueller R., Ali I. Process Mining vs. Business Process Management. URL: <https://www.macrosoftinc.com/process-mining-vs-business-process-management> (дата обращения: 12.05.2023).
2. Turing. A Guide on Word Embeddings in NLP. URL: <https://www.turing.com/kb/guide-on-word-embeddings-in-nlp> (дата обращения: 05.05.2023).
3. Beaumont R. Image embeddings. URL: <https://rom1504.medium.com/image-embeddings-ed1b194d113e> (дата обращения: 01.05.2023).
4. Mos.ru. Официальный сайт мэра Москвы. URL: <https://www.mos.ru> (дата обращения: 14.05.2023).
5. De Koninck P., Broucke S. V., De Weerd J. Act2vec, trace2vec, log2vec, and model2vec: Representation Learning for Business Processes // 16th International Conference on Business Process Management. Sydney, NSW, Australia, 2018. P. 305–321. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-98648-7_18 (дата обращения: 22.04.2023).
6. Mikolov T., Sutskever I., Chen K. [et al.]. Distributed representations of words and phrases and their compositionality // 27th Annual Conference on Neural Information Processing Systems. Lake Tahoe, Nevada, United States, 2013. P. 3111–3119. URL: <https://arxiv.org/abs/1310.4546> (дата обращения: 14.04.2023).
7. Towards Data Science. Ria Kulshrestha. NLP 101: Word2Vec – Skip-gram and CBOW. URL: <https://towardsdatascience.com/nlp-101-word2vec-skip-gram-and-cbow-93512ee24314> (дата обращения: 20.04.2023).

8. Weng L. Learning Word Embedding. URL: <https://lilianweng.github.io/posts/2017-10-15-word-embedding> (дата обращения: 25.04.2023).
9. Капаца Е. Быстрое кодирование (One-Hot Encoding) // Машинное обучение доступным языком. URL: <https://www.helenkapatsa.ru/bystroie-kodirovaniie> (дата обращения: 01.05.2023).
10. Le Q., Mikolov T. Distributed Representations of Sentences and Documents // Proceedings of the 31th International Conference on Machine Learning (ICML-14). Beijing, China, 2014. P. 1188–1196. URL: <https://arxiv.org/pdf/1405.4053.pdf> (дата обращения: 15.04.2023).
11. Budhiraja A. A simple explanation of document embeddings generated using Doc2Vec // Medium. URL: <https://medium.com/@amarbudhiraja/understanding-document-embeddings-of-doc2vec-bfe7237a26da> (дата обращения: 06.04.2023).
12. Narayanan A., Chandramohan M., Venkatesan R. [et al.]. Graph2vec: Learning Distributed Representations of Graphs. URL: <https://arxiv.org/abs/1707.05005> (дата обращения: 25.04.2023).
13. Jiang J., Cui Z., Xu Ch., Yang J. Gaussian-Induced Convolution for Graphs // Proceedings of the 33th AAAI Conference on Artificial Intelligence and 31th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference and 9th AAAI Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence. Honolulu, Hawaii, USA, 2019. P. 4007–4014. URL: <https://arxiv.org/abs/1811.04393> (дата обращения: 25.04.2023).
14. Qiu J., Dong Y., Ma H. [et al.]. Network Embedding as Matrix Factorization: Unifying DeepWalk, LINE, PTE, and node2vec // Proceedings of the 11th Eleventh ACM International Conference on Web Search and Data Mining. ACM, Los Angeles, California, USA, 2018. P. 459–467. URL: <https://arxiv.org/abs/1710.02971> (дата обращения: 23.04.2023).
15. Grover A., Leskovec J. Node2vec: Scalable Feature Learning for Networks // Proceedings of the 22th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM, San Francisco, California, USA, 2016. P. 855–864. URL: <https://arxiv.org/abs/1607.00653> (дата обращения: 30.04.2023).
16. Perozzi B., Al-Rfou R., Skiena S. DeepWalk: Online Learning of Social Representations // Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, USA, 2014. P. 701–710. URL: <https://arxiv.org/abs/1403.6652> (дата обращения: 28.04.2023).
17. Precision and recall // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall (дата обращения: 02.05.2023).
18. Оценка качества в задачах классификации и регрессии // ИТМО. URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Оценка_качества_в_задачах_классификации_и_регрессии (дата обращения: 05.05.2023).
19. Площадь под ROC-кривой // Loginom. URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/auc.html> (дата обращения: 07.05.2023).
20. Кревский М. И. «НЕРВ» – система интеллектуального анализа процессов оказания государственных услуг // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. по материалам XXI Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2022. С. 79–83.

References

1. Mueller R., Ali I. *Process Mining vs. Business Process Management*. Available at: <https://www.macrosoftinc.com/process-mining-vs-business-process-management> (accessed 12.05.2023).
2. Turing. *A Guide on Word Embeddings in NLP*. Available at: <https://www.turing.com/kb/guide-on-word-embeddings-in-nlp> (accessed 05.05.2023).
3. Beaumont R. *Image embeddings*. Available at: <https://rom1504.medium.com/image-embeddings-ed1b194d113e> (accessed 01.05.2023).

4. Mos.ru. *Ofitsial'nyy sayt mera Moskvyy = Mos.ru. The official website of the Mayor of Moscow.* (In Russ.). Available at: <https://www.mos.ru> (accessed 14.05.2023).
5. De Koninck P., Broucke S.V., De Weerd J. Act2vec, trace2vec, log2vec, and model2vec: Representation Learning for Business Processes. *16th International Conference on Business Process Management*. Sydney, NSW, Australia, 2018:305–321. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-98648-7_18 (accessed 22.04.2023).
6. Mikolov T., Sutskever I., Chen K. et al. Distributed representations of words and phrases and their compositionality. *27th Annual Conference on Neural Information Processing Systems*. Lake Tahoe, Nevada, United States, 2013:3111–3119. Available at: <https://arxiv.org/abs/1310.4546> (accessed 14.04.2023).
7. *Towards Data Science. Ria Kulshrestha. NLP 101: Word2Vec – Skip-gram and CBOW.* Available at: <https://towardsdatascience.com/nlp-101-word2vec-skip-gram-and-cbow-93512ee24314> (accessed 20.04.2023).
8. Weng L. *Learning Word Embedding.* Available at: <https://lilianweng.github.io/posts/2017-10-15-word-embedding> (accessed 25.04.2023).
9. Kapatsa E. Fast coding (One-Hot Encoding). *Mashinnoe obuchenie dostupnym yazykom = Machine learning in a foreign language.* (In Russ.). Available at: <https://www.helenkapatsa.ru/bystroie-kodirovaniie> (accessed 01.05.2023).
10. Le Q., Mikolov T. Distributed Representations of Sentences and Documents. *Proceedings of the 31th International Conference on Machine Learning (ICML-14)*. Beijing, China, 2014:1188–1196. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1405.4053.pdf> (accessed 15.04.2023).
11. Budhiraja A. A simple explanation of document embeddings generated using Doc2Vec. *Medium*. Available at: <https://medium.com/@amarbudhiraja/understanding-document-embeddings-of-doc2vec-bfe7237a26da> (accessed 06.04.2023).
12. Narayanan A., Chandramohan M., Venkatesan R. et al. *Graph2vec: Learning Distributed Representations of Graphs.* Available at: <https://arxiv.org/abs/1707.05005> (accessed 25.04.2023).
13. Jiang J., Cui Z., Xu Ch., Yang J. Gaussian-Induced Convolution for Graphs. *Proceedings of the 33th AAAI Conference on Artificial Intelligence and 31th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference and 9th AAAI Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence*. Honolulu, Hawaii, USA, 2019:4007–4014. Available at: <https://arxiv.org/abs/1811.04393> (data obrashcheniya: 25.04.2023).
14. Qiu J., Dong Y., Ma H. et al. Network Embedding as Matrix Factorization: Unifying DeepWalk, LINE, PTE, and node2vec. *Proceedings of the 11th Eleventh ACM International Conference on Web Search and Data Mining*. ACM, Los Angeles, California, USA, 2018:459–467. Available at: <https://arxiv.org/abs/1710.02971> (accessed 23.04.2023).
15. Grover A., Leskovec J. Node2vec: Scalable Feature Learning for Networks. *Proceedings of the 22th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. ACM, San Francisco, California, USA, 2016:855–864. Available at: <https://arxiv.org/abs/1607.00653> (accessed 30.04.2023).
16. Perozzi B., Al-Rfou R., Skiena S. *DeepWalk: Online Learning of Social Representations // Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, USA, 2014:701–710. Available at: <https://arxiv.org/abs/1403.6652> (accessed 28.04.2023).
17. Precision and recall. *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall (accessed 02.05.2023).
18. Quality assessment in classification and regression tasks. *ITMO*. (In Russ.). Available at: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Otsenka_kachestva_v_zadachakh_klassifikatsii_i_regressii (accessed 05.05.2023).

19. Area under the ROC curve. *Loginom*. (In Russ.). Available at: <https://wiki.loginom.ru/articles/auc.html> (accessed 07.05.2023).
20. Krevskiy M.I. "NERVE" – a system of intellectual analysis of the processes of rendering public services. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. st. po materialam XXI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of informatics in education, management, economics and technology : collection of articles based on the materials of the XXI International Scientific and Technical. conf.* Penza, 2022:79–83. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Игоревич Кревский

старший аналитик отдела мониторинга
и анализа государственных услуг,
Государственное казенное учреждение
«Информационный город»
(Россия, г. Москва,
1-й Красногвардейский пр-д, 21, стр. 1)
E-mail: westhemer1@gmail.com

Mikhail I. Krevskiy

Senior analyst of the department
of monitoring and analysis of public services,
State government institution "Info City"
(bld. 1, 21 1st Krasnogvardeysky avenue,
Moscow, Russia)

Александр Сергеевич Бождай

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: bozhday@yandex.ru

Aleksandr S. Bozhday

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of computer-aided design systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 11.08.2023

Принята к публикации/Accepted 05.09.2023

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ОСТЕОИНТЕГРАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ВСПЕНИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**А. Н. Митрошин¹, С. А. Нестеров²,
С. М. Геращенко³, М. А. Ксенофонтов⁴**

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ an-mitroshin@mail.ru, ² nesterovs@list.ru, ³ sgerash@mail.ru, ⁴ maksenofontov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Остеоинтеграция изделий медицинской техники, в том числе имплантатов, в кость является одним из основных условий успешного результата оперативного лечения. Для повышения надежности функционирования изделий медицинской техники за счет улучшения остеинтегративных свойств, авторами разработана уникальная технология развития поверхности имплантируемого компонента. Таким образом, целью работы является разработка технологии развития поверхности изделий медицинской техники, основанной на лазерном вспенивании металла. *Материалы и методы.* Экспериментальными исследованиями доказано, что геометрия поверхности и структура поверхностного слоя после лазерного вспенивания соответствует требованиям к изделиям медицинской техники, предъявляемым для лучшей остеонтеграции в кость пациента. Результаты подтверждены данными оптической и электронной микроскопии. *Результаты.* Исследования показали, что наиболее значимое влияние на структуру поверхностного слоя оказывает состав газовой среды, в которой выполнялось вспенивание. Данный фактор определяет появление в поверхностном слое большого количества химических соединений, которые значительно изменяют свойства материала. Установлено, что увеличение химической неоднородности поверхностного слоя значительно возрастает с введением воздуха в состав рабочей среды. При использовании в качестве рабочей среды аргона нормализуется структура поверхности до уровня основы материала. *Выводы.* В процессе работы на выбранном участке поверхности изделий медицинской техники создана развитая структура без изменения химического состава. В процессе обработки изделий рекомендуется использовать среду в виде инертного газа, причем давление среды должно быть выше 8 Bar, скорость подачи лазерной головки должна быть не менее чем 5000 мм/мин, но не превышать 10 000 мм/мин.

Ключевые слова: остеинтеграция, лазер, развитие поверхности, металлическая поверхность

Для цитирования: Митрошин А. Н., Нестеров С. А., Геращенко С. М., Ксенофонтов М. А. Способ повышения остеинтеграции изделий медицинской техники на основе лазерного вспенивания металлических поверхностей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 155–166. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-11

METHOD FOR INCREASING OSSEOINTEGRATION OF MEDICAL EQUIPMENT BASED ON LASER FOAMING OF METAL SURFACES

A.N. Mitroshin¹, S.A. Nesterov²,
S.M. Gerashchenko³, M.A. Ksenofontov⁴

^{1, 2, 3, 4} Penza State University, Penza, Russia

¹ an-mitroshin@mail.ru, ² nesterovs@list.ru, ³ sgerash@mail.ru, ⁴ maksenofontov@mail.ru

Abstract. *Background.* Osseointegration of medical equipment, including implants, into the bone is one of the main conditions for a successful outcome of surgical treatment. To improve the reliability of the functioning of medical equipment products by improving the osseointegrative properties, the authors have developed a unique technology for developing the surface of the implanted component. Thus, the aim of the work is to develop a technology for developing the surface of medical equipment products based on laser metal foaming. *Materials and methods.* Experimental studies have shown that the surface geometry and structure of the surface layer after laser foaming meet the requirements for medical equipment products for better osseointegration into the patient's bone. The results were confirmed by optical and electron microscopy data. *Results.* Studies have shown that the composition of the gaseous medium has the most significant effect on the structure of the surface layer. This factor determines the appearance in the surface layer of a large number of chemical compounds that significantly change the properties of the material. During the experiment, this factor was varied, and the rest were stabilized at a constant level. It has been established that the increase in the chemical inhomogeneity of the surface layer increases significantly with the introduction of air into the composition. When Argon is used as a working medium, the surface structure is normalized to the level of the material base. *Conclusions.* In the process of work, a developed structure was created on the selected surface area without changing the chemical composition with an increase in the area of osseointegrated structures up to 100 % of the original surface. For processing, it is recommended to use an inert gas medium, and the medium pressure must be above 8 bar. The feed speed of the laser head should be at least 5000 mm/min, but not exceed 10 000 mm/min.

Keywords: osseointegration, laser, surface development, metal surface

For citation: Mitroshin A.N., Nesterov S.A., Gerashchenko S.M., Ksenofontov M.A. Method for increasing osseointegration of medical equipment based on laser foaming of metal surfaces. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(3):155–166. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-11

Введение

Первоначально остеointеграция определялась как прямая структурная и функциональная связь между живой костью и поверхностью несущего нагрузку металлического компонента [1]. В настоящее время остеointегрированным компонент можно назвать тогда, когда между имплантированным металлом и костью нет подвижности [2].

Остеointеграция, обеспечивающая долгосрочную стабильность изделий медицинской техники, является результатом анатомической и функциональной взаимосвязи, возникающей на границе контакта костной ткани с поверхностью имплантируемого компонента [3, 4]. Первичная механическая фиксация имплантата по принципу press-fit в дальнейшем сменяется остеointеграцией, возникающей в результате физического и химического взаимодействия между поверхностью имплантированного компонента и костной тканью [5–7].

Выделяют три стадии формирования костной ткани на границе с имплантатом: остеиндукцию, остеокондукцию и остеомоделирование [8, 9].

Для создания поверхностей, обеспечивающих более надежную механическую фиксацию и ускоряющих биологические процессы остеоинтеграции, в настоящее время используют различные технологии, включающие в себя пескоструйную обработку, травление кислотами, рельефную формовку, ионно-плазменное напыление, микродуговое оксидирование и т.д., а также нанесение специальных текстурированных и биокерамических покрытий [10]. Современные исследования по развитию остеоинтегративного потенциала имплантатов связаны с несколькими направлениями: улучшением геометрии контактной поверхности имплантатов и совершенствованием технологий создания развитой поверхности имплантата, которые повышают надежность фиксации при остеоинтеграции [11].

В основе разработанной технологии создания развитой поверхности лазерным вспениванием лежит процесс геометрического преобразования материала поверхности в результате теплового управляемого воздействия, вызванного плазменным каналом лазерной дуги. Точечное воздействие пучка лазера, перемещаемого по управляемой программе, позволяет сформировать зонированное развитие на выбранных поверхностях. Обеспечение обработки либо в вакууме, либо в среде защитных газов позволяет сформировать развитую поверхность без изменения химического состава поверхности, что обеспечивает лучшую остеоинтеграцию изделий медицинской техники.

Задача работы состоит в исследовании влияния на формирование геометрии и химического состава пористой структуры материала, определяющей остеоинтеграционный функционал поверхности имплантов режимов лазерного вспенивания поверхности, оказывающих приоритетное воздействие на характеристики поверхностного слоя.

Материалы и методы

Для реализации предложенной технологии использовалась универсальная лазерная установка BODOR F6015 мощностью лазерного излучения 3 КВт. Обрабатываемые детали помещают под луч лазера, который формируется в струе инертного газа. В качестве источника излучения выступает волоконный лазер. Высокоинтенсивный поток плазмы, формируемый лазерным лучом, производит тепловое воздействие на обрабатываемую поверхность и превращает твердое тело в зоне фокусирования луча в жидкое и газообразное состояние (температура в зоне фокусировки достигает 6000 градусов). Вследствие зонального воздействия лазерного луча в точке фокусировки, образуется канавка и из нее начинает испаряться и извлекаться под действием как потока испаряющихся частиц, так и потока инертного газа материал, формируя полость. Последовательное перемещение точки фокусировки по поверхности формирует продольную канавку с регулярной геометрией. При наличии наклона как оси луча лазера, так и подачи потока газа возможно управляемое формирование структуры с образованием поднутрений.

На процесс формирования геометрии таких канавок влияют как физико-механические свойства материала поверхности, так и технологические параметры установок и процесса обработки.

При проведении исследований постоянными были приняты параметры, значения которых были выбраны на основе экспертных оценок:

1. Длина волны лазерного излучения. По умолчанию приняли значение 1080 ± 3 нм.

2. Частота лазерного излучения. По умолчанию приняли значение 5000 Гц.
3. Скважность лазерного импульса – отношение длительности лазерного импульса к продолжительности одного цикла лазерного воздействия. По умолчанию приняли значение 43 %.

4. Мощность лазерного излучения выбиралась из достаточности для выполнения функции расплава и испарения материала с целью формирования канавки с регулярной геометрией. Уровень мощности варьировали от 1050 до 1650 Вт с шагом 195 Вт.

5. Фокусное расстояние линз для обеспечения концентрации потока луча на единицу площади выбирали исходя из размера пятна контакта на уровне 50 мкм.

6. Угол наклона оси лазерного луча к обрабатываемой поверхности, варьировали от 60° до 90°.

7. Давление потока газа для обдува зоны обработки варьировали от 0,1 до 1,7 МПа.

8. Состав потока газа выбирался из двух вариантов: технического воздуха и инертного газа – аргона.

В качестве переменных при проведении математического моделирования были выбраны факторы, оказывающие наиболее значительное влияние на формирование структуры поверхностного слоя для оценки формы, геометрии поверхности и химической однородности материала: мощность лазера N , Вт, (варьировали от 1050 до 1650 Вт); скорость подачи лазерного источника относительно обрабатываемой поверхности S , мм/мин (варьировали от 5050 до 9500 мм/мин); скважность лазерного импульса K , % (варьировали от 23 до 63 %); давление газа p , Bar (варьировали от 1 до 9 Bar).

Для проведения исследований использовался комплект измерительных приборов, позволивших провести оценку факторов, необходимых для проведения экспериментов.

Для исследования структуры поверхностного слоя использовался металлографический микроскоп Биомед ММР-2 и микроскоп электронный растровый настольный ЕМ-30 PLUS для визуализации измерений линейных размеров микрорельефа поверхности твердотельных структур, количественного морфологического и химического анализа.

Для исследования использовались специально изготовленные образцы (рис. 1). Следует отметить, что и специальные, и натурные образцы выбирались из одной партии поставки заготовок.

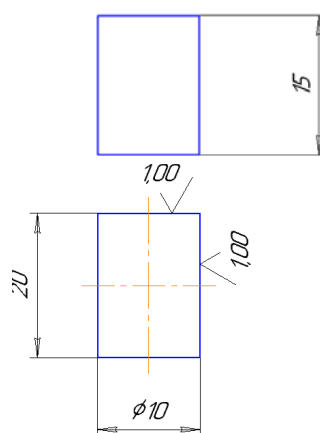


Рис. 1. Экспериментальные образцы

Все образцы изготавливались из титанового сплава ВТ6. Химический состав приведен в табл. 1. Обрабатываемые участки перед воздействием лазера подвергались шлифованию до шероховатости Ra 1 мкм.

Таблица 1

Химический состав титанового сплава ВТ6

Титан	86,45 %
Железо	до 0,6 %
Ванадий	до 5,3 %
Углерод	0,1 %
Цирконий	до 0,3 %
Кремний	0,1 %
Алюминий	до 6,8 %
Азот	0,05 %
Кислород	до 0,2 %
Водород	0,015 %

В качестве рабочих сред использовались воздух технологический давлением до 20 Bar (2 МПа) и аргон давлением до 12 Bar (1,2 МПа).

Воздух использовался из технологической линии, подготовленный в соответствии с ГОСТ 17433-80. «Промышленная чистота. Сжатый воздух». Класс загрязненности 2 (Воздух кл. 2. ГОСТ 17433-80).

Аргон выбирался в качестве технологической среды как основной, так как согласно рекомендациям ряда авторов он является основным инертным газом, который дает максимальную защиту для титановых сплавов при высокотемпературной обработке (сварка, термообработка, напыление и т.д.) [1].

При выборе рабочей среды важным параметром является количество (расход) и давление, которое обеспечит гарантированное сохранение химического состава в процессе обработки. Геометрия пор является определяющим фактором для создания условий остеоинтеграции, а химический состав поверхностного слоя определяет физико-механические характеристики развитой пористой структуры. В связи с этим в качестве оцениваемых параметров были приняты геометрия пор (глубина и ширина) и химический состав поверхностного слоя.

Для прогнозирования наиболее важного параметра – глубины пор – была проведена серия экспериментов по методике многофакторного планирования методом ротатбельного униформ-планирования с целью получить регрессионные математические модели оценки влияния выбранных факторов на отклик.

Результаты

На основе анализа данных фотометрии микрошлифов поперечных срезов поверхности на оптическом микроскопе (рис. 2) и моделирования методом обработки экспериментальных данных получены регрессионные математические модели, позволяющие определить влияние на глубину пор условий обработки.

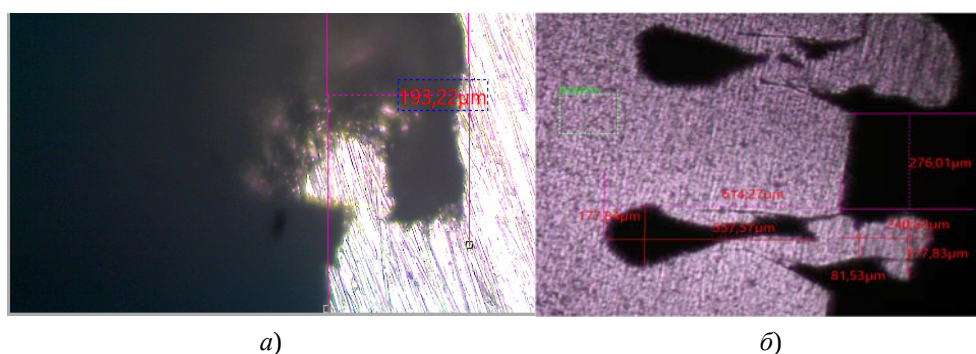


Рис. 2. Данные фотометрии поверхности с оптического микроскопа Биомед ММР-2 (условия обработки: длина волны лазерного излучения – 1080 нм; частота лазерного излучения – 5000 Гц; скважность лазерного импульса – 43 %; скорость воздействия сфокусированного луча на точку поверхности (подача луча лазера) – 8000 мм/мин): а – состав газовой среды – аргон; суммарная мощность лазерного излучения – 1050 Вт; угол наклона оси лазерного луча к обрабатываемой поверхности – 60°; давление потока газа – 10 Бар; шаг между соседними проходами – 0,5 мм; б – состав газовой среды – воздух; суммарная мощность лазерного излучения – 1550 Вт; угол наклона оси лазерного луча к обрабатываемой поверхности – 90°; давление потока газа – 4 Бар; шаг между соседними проходами – 0,3 мм

Основными факторами, влияющими на процесс формирования пор при лазерном вспенивании поверхности, являются: мощность лазера N , Вт; скорость подачи лазерного источника относительно обрабатываемой поверхности S , мм/мин; скважность лазерного импульса K , %; давление газа p , Бар. В качестве функций отклика была принята глубина пор H , мкм.

После математической обработки экспериментальных данных по методике ротатабельного униформ-планирования была получена регрессионная модель влияния выбранных факторов на глубину пор:

$$H = -6641 + 4,68N + 0,41S + 49,55K + 142,5p - 0,0012N^2 - 0,0002S^2 - 0,43K^2 - 12,5p^2.$$

Рекомендовано использовать полученную зависимость при расчетах глубины пор в ограниченных условиях, при которых проводился эксперимент.

Для графической иллюстрации влияния переменных на параметры функции отклика рассмотрим графические зависимости на рис. 3–5.

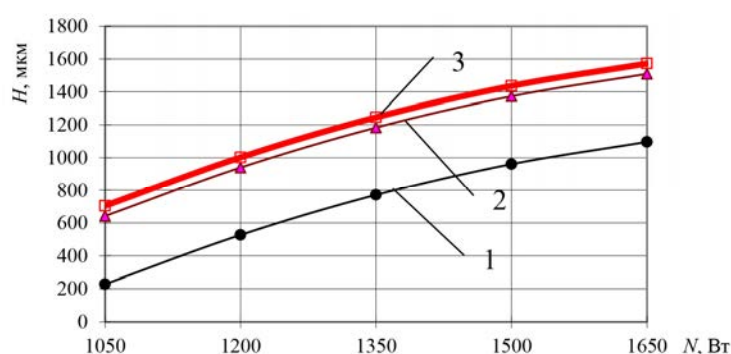


Рис. 3. Влияние мощности на глубину пор:
1 – $S = 5000$ мм/мин; 2 – $S = 8000$ мм/мин; 3 – $S = 9500$ мм/мин; $K = 43$ %; $p = 5$ Бар

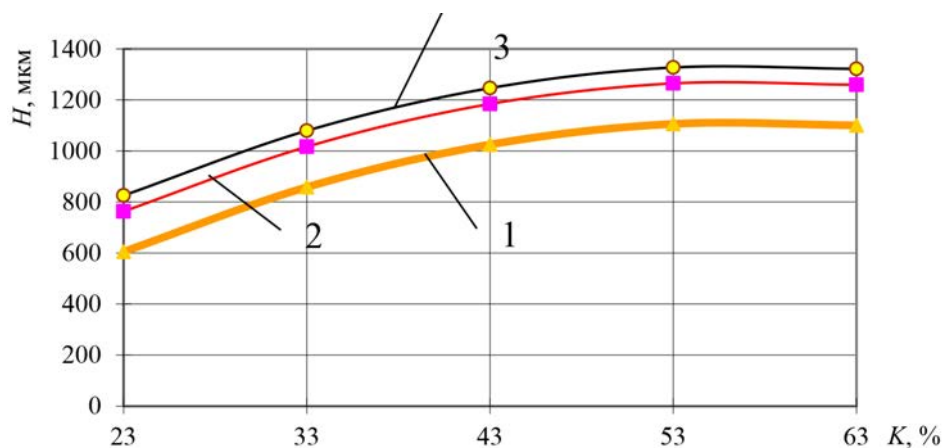


Рис. 4. Влияние скважности лазерного излучения на глубину пор:
 1 – $S = 6500$ мм/мин; 2 – $S = 8000$ мм/мин; 3 – $S = 9500$ мм/мин; $N = 1350$ Вт; $p = 5$ Бар

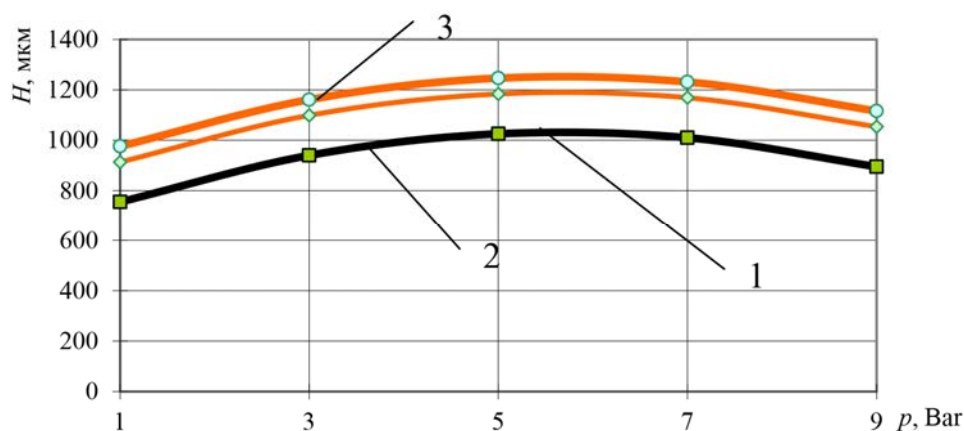


Рис. 5. Влияние давления газа на глубину пор:
 1 – $S = 6500$ мм/мин; 2 – $S = 8000$ мм/мин; 3 – $S = 9500$ мм/мин; $K = 43$ %; $N = 51350$ Вт

Анализируя полученные зависимости, можно сделать выводы, что увеличение мощности лазерного источника прямо пропорционально мощности затрачиваемой на расплавление материала в зоне обработки и количеству частиц, удаляемых от поверхности детали. Зависимость почти линейна, поскольку тепловой импульс пропорционален мощности. Аналогично можно оценить и влияние скважности на отклик. Величина давления инертного газа нелинейно влияет на процесс формирования пор в зоне обработки и с неким стремлением к пределу также увеличивает мощность до максимального значения, равного величине силы, действующей на поверхность детали со стороны струи.

Обсуждение

На основании исследований [11, 12] известны размеры пор, рекомендуемые для эффективной остеоинтеграции. Их размер по ширине рекомендуется в интервале от 100 до 300 мкм, а глубина до 1500 мкм.

На основании полученных моделей мы можем управлять режимами обработки изделий медицинской техники с учетом лазерного вспенивания металлических поверхностей для достижения рекомендуемых параметров поверхностного слоя для лучшей остеоинтеграции.

Анализируя влияние скорости подачи на формирование глубины пор исходя из данных рис. 3–5, можно сделать вывод, что значения должны быть не менее чем 5000 мм/мин, но не превышать 10 000 мм/мин. Низкая скорость уменьшает производительность и увеличивает количество теплового воздействия на поверхность, что вредно сказывается на качестве. Высокая скорость не обеспечивает проплавление и удаление частиц из зоны обработки.

Слой деформированного металла образуется практически при любом виде обработки при изготовлении изделий медицинской техники. Одним из наиболее значимых факторов, определявших структуру деформированного поверхностного слоя, является состав и распределение по глубине морфологии и химического состава поверхности.

Исследования геометрии и химического состава материала на электронном микроскопе показали, что наиболее значимое влияние на стабильность поверхностного слоя оказывает состав газовой среды в зоне обработки. Данный фактор определяет появление в поверхностном слое большого количества химических соединений, которые значительно меняют свойства материала.

Исследование химического состава поверхностного слоя образцов изделий медицинской техники методом электронной микроскопии показало, что обработка не приводит к существенным структурным изменениям. Данные о результатах контроля химического состава в поверхностных слоях приведены на рис. 6.

Наличие в поверхностном слое соединений кислорода (в виде оксидов), углерода (в виде карбидов) и чистого водорода обеспечивает существенное повышение твердости и как следствие уменьшение прочности развитой поверхности.

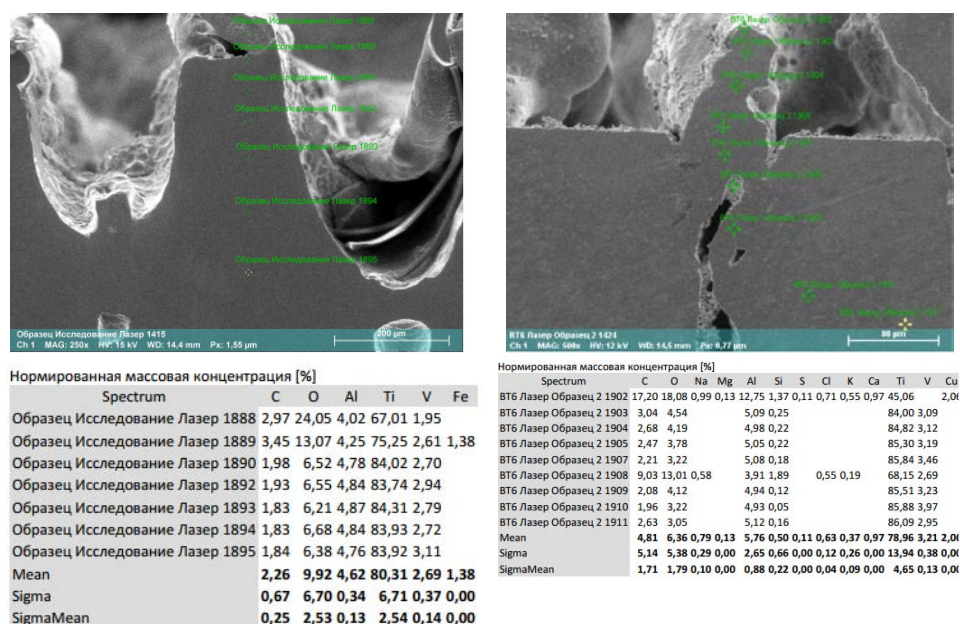
Для уменьшения формирования указанных выше соединений предложено применять в качестве рабочей среды чистый аргон.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что чем выше концентрация аргона в зоне обработки, тем меньше наличие вредных химических соединений, формирующихся в результате высокого термического воздействия. Именно наличие высокотвердых соединений оксидов и карбидов дает существенное повышение твердости в приповерхностных структурах.

При проведении дополнительного эксперимента производилось варьирование давления газовой среды, при этом остальные параметры были стабилизированы на постоянном уровне.

Из анализа данных (см. рис. 2,б) видно, что при давлении менее чем 10 Ваг в порах остается значительное количество остаточного материала. На микрошлифах наблюдаются следы этого материала в виде застывших язычков, имеющих к тому же большое количество оксидов в своем составе и, соответственно, остаточный водород в своей структуре, что значительно ослабляет прочность сцепления развитой поверхности с основой.

На рис. 7 приведен график влияния давления потока газа на процент остатка расплава в порах, $K_{зап}$, %.



а)

б)

Рис. 6. Данные электронной микроскопии с поверхности обработанной лазерным вспениванием:

а – среда – воздух; длина волны лазерного излучения – 1080 нм; частота лазерного излучения – 5000 Гц; скважность лазерного импульса – 43 %; скорость воздействия сфокусированного луча на точку поверхности (подача луча лазера) – 8000 мм/мин; состав газовой среды – воздух; суммарная мощность лазерного излучения – 1050 Вт; угол наклона оси лазерного луча к обрабатываемой поверхности – 60°; давление потока газа – 1 Bar; шаг между соседними проходами – 0,5 мм; б – среда – аргон; длина волны лазерного излучения – 1080 нм; частота лазерного излучения – 5000 Гц; скважность лазерного импульса – 43 %; скорость воздействия сфокусированного луча на точку поверхности (подача луча лазера) – 8000 мм/мин; состав газовой среды – аргон; суммарная мощность лазерного излучения – 1050 Вт; угол наклона оси лазерного луча к обрабатываемой поверхности – 90°; давление потока газа – 5 Bar; шаг между соседними проходами – 0,5 мм

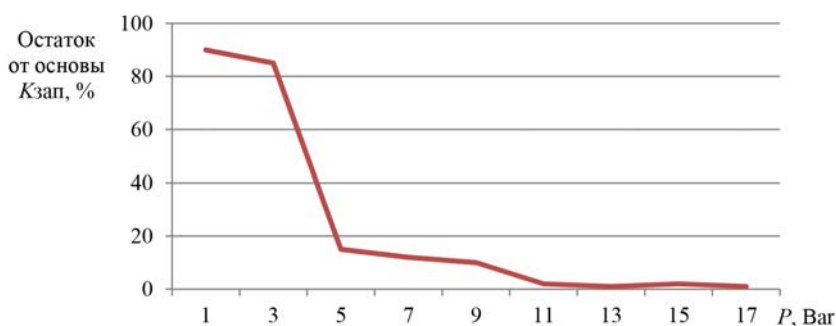


Рис. 7. График влияния давления потока газа на процент остатка расплава в порах (условия обработки: длина волны лазерного излучения – 1080 нм; частота лазерного излучения – 5000 Гц; скважность лазерного импульса – 43 %; скорость воздействия сфокусированного луча на точку поверхности (подача луча лазера) – 8000 мм/мин; состав газовой среды – аргон; суммарная мощность лазерного излучения – 1050 Вт; угол наклона оси лазерного луча к обрабатываемой поверхности – 90°; шаг между соседними проходами – 0,5 мм)

Результаты проведенных исследований показали, что повышение давления в зоне обработки выше 10 Bar практически не влияет на изменение характеристик и химического состава приповерхностных структур. На основании полученных данных можно привести рекомендации о применении давления аргона в зоне обработки при давлении не менее 8 Bar.

Заключение

После обработки экспериментальных данных получены математические модели, позволяющие определить влияние условий обработки на глубину пор приповерхностных структур изделий медицинской техники. На основе анализа влияния параметров обработки на параметры пор была выявлена необходимость использования полученной зависимости при расчетах глубины пор в ограниченных условиях, при которых проводился эксперимент. Для обработки рекомендуется использовать среду в виде инертного газа, причем давление среды должно быть выше 8 Bar. Это позволит нивелировать вредные химические реакции, которые могут возникать при обработке на воздухе, который обеспечивает выдувание расплавленных частиц из лунки и полную ее очистку. Шаг между соседними проходами лазера должен быть больше на 20 %, чем ширина лунки формируемой на вспененной поверхности, скорость подачи должна быть не менее чем 5000 мм/мин, но не превышать 10 000 мм/мин.

Рекомендуемые основные параметры для обработки поверхности импланта из материала ВТ6 лазерным вспениванием на лазере для получения размеров пор рекомендованных в работе [11]: среда обработки – струя аргона давлением 8 Bar, мощность излучения – 1,2 кВт, скважность импульса – 43 %, скорость подачи лазерного луча – 8000 мм/мин, шаг между соседними проходами – 120 мкм.

Список литературы

1. Branemark P. I., Hansson B. O., Adell R. [et al]. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period // *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery*. 1977. Vol. 16, № 10. P. 1–132.
2. Guglielmotti M. B., Olmedo D. G., Cabrini R. L. Research on implants and osseointegration // *Periodontol* 2000. 2019. Vol. 79, № 1. P. 178–189. doi: 10.1111/prd.12254. PMID: 30892769
3. Stich T., Alagboso F., Křenek T. [et al]. Implant-bone-interface: Reviewing the impact of titanium surface modifications on osteogenic processes in vitro and in vivo // *Bioengineering & Translation Medicine*. 2021. Vol. 7, № 1. P. 10239. doi: 10.1002/btm2.10239. PMID: 35079626; PMCID: PMC8780039
4. Albrektsson T., Wennerberg A. On osseointegration in relation to implant surfaces // *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2019. № 1. P. 4–7. doi: 10.1111/cid.12742
5. Тихилов Р. М., Шубняков И. И. Руководство по хирургии тазобедренного сустава. СПб. : РНИИТО им. Р. Р. Вредена, 2014. Т. 1. С. 368.
6. Annunziata M., Guida L. The effect of titanium surface modifications on dental implant osseointegration // *Frontiers of Oral Biology*. 2015. № 17. P. 62–77.
7. Wennerberg A., Albrektsson T. Effects of titanium surface topography on bone integration: a systematic review // *Clinical Oral Implants Research*. 2009. Vol. 20, № 4. P. 172–184.
8. Янушевич О. О., Островская И. Г., Вавилова Т. П. Молекулярная стоматология. 1-е изд. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2020. С. 160.

9. Какачи К., Нейгебауэр Й., Шлегел А. Справочник по дентальной имплантологии. 1-е изд. М. : МЕДпресс-информ, 2009. С. 208.
10. Калмин О. В., Розен М. А., Никишин Д. В. Особенности остеогенеза при вживлении титанового имплантата, подвергнутого микродуговому оксидированию, с использованием «КоллапАнгель» и без него // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2013. № 3. С. 116–127.
11. Тумилович М. В., Савич В. В., Шелухина А. И. Влияние формы и размера частиц на остеоинтеграцию пористых имплантатов из порошка Титана // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2016. № 7. С. 115–119.
12. Cook S. D., Georgette F. S., Skinner H. B. [et. al.] Fatigue properties of carbon-and porous-coated Ti-6Al-4V alloy // Journal of Biomedical Materials Research. 1984. Vol. 18. P. 497–512.

References

1. Branemark P.I., Hansson B.O., Adell R. et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery*. 1977;16(10):1–132.
2. Guglielmotti M.B., Olmedo D.G., Cabrini R.L. Research on implants and osseointegration. *Periodontol 2000*. 2019;79(1):178–189. doi: 10.1111/prd.12254. PMID: 30892769
3. Stich T., Alagboso F., Křenek T. et al. Implant-bone-interface: Reviewing the impact of titanium surface modifications on osteogenic processes in vitro and in vivo. *Bioengineering & Translation Medicine*. 2021;7(1):10239. doi: 10.1002/btm2.10239. PMID: 35079626; PMCID: PMC8780039
4. Albrektsson T., Wennerberg A. On osseointegration in relation to implant surfaces. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2019;(1):4–7. doi: 10.1111/cid.12742
5. Tikhilov R.M., Shubnyakov I.I. *Rukovodstvo po khirurgii tazobedrennogo sustava = Guidelines for hip joint surgery*. Saint Petersburg: RNIITO im. R.R. Vredena, 2014;1:368. (In Russ.)
6. Annunziata M., Guida L. The effect of titanium surface modifications on dental implant osseointegration. *Frontiers of Oral Biology*. 2015;(17):62–77.
7. Wennerberg A., Albrektsson T. Effects of titanium surface topography on bone integration: a systematic review. *Clinical Oral Implants Research*. 2009;20(4):172–184.
8. Yanushevich O.O., Ostrovskaya I.G., Vavilova T.P. *Molekulyarnaya stomatologiya. 1-e izd. = Molecular dentistry. 1st ed*. Moscow: GEOTAR-Media, 2020:160. (In Russ.)
9. Kakachi K., Neygebauer Y., Shlegel A. *Spravochnik po dental'noy implantologii. 1-e izd. = Handbook of dental implantology. 1st ed*. Moscow: MEDpress-inform, 2009:208. (In Russ.)
10. Kalmin O.V., Rozen M.A., Nikishin D.V. Features of osteogenesis during implantation of a titanium implant subjected to microarc oxidation, using "Collapangel" and without it. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = Izvestia of Higher educational institutions. Volga region. Medical sciences*. 2013;(3):116–127. (In Russ.)
11. Tumilovich M.V., Savich V.V., Shelukhina A.I. The influence of particle shape and size on the osseointegration of porous implants made of Titanium powder. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki = Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 2016;(7):115–119. (In Russ.)
12. Cook S.D., Georgette F.S., Skinner H.B. et. al. Fatigue properties of carbon and porous-coated Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Biomedical Materials Research*. 1984;18:497–512.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Митрошин

доктор медицинских наук, профессор,
директор Медицинского института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: an-mitroshin@mail.ru

Aleksandr N. Mitroshin

Doctor of medical sciences, professor,
director of the Medical Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Нестеров

доцент кафедры технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nesterovs@list.ru

Sergey A. Nesterov

Associate professor of the sub-department
of technology and equipment
of machine building,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Михайлович Геращенко

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sgerash@mail.ru

Sergey M. Gerashchenko

Doctor of technical sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of medical cybernetics and informatics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Михаил Анатольевич Ксенофонов

старший преподаватель кафедры
травматологии, ортопедии
и военно-экстремальной медицины,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Maksenofontov@mail.ru

Mikhail A. Ksenofontov

Senior lecturer of the sub-department
of traumatology, orthopedics
and military extreme medicine,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 05.07.2023

Поступила после рецензирования/Revised 01.09.2023

Принята к публикации/Accepted 05.09.2023

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ STREAMLIT

О. Ю. Кузнецова¹, Р. Н. Кузнецов², А. В. Кузьмин³

^{1, 2, 3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ ellekasandra@yandex.ru, ² nahab007@rambler.ru, ³ a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* MLOps (Machine Learning Operations) является актуальной и важной темой в сфере машинного обучения. Он объединяет практики и процессы, необходимые для эффективной разработки, развертывания и управления моделями машинного обучения. *Материалы и методы.* Для прогнозирования осложнений после хирургического вмешательства разрабатывался пользовательский web-интерфейс с использованием Streamlit. В данной работе применялся конвейер машинного обучения с помощью библиотеки Scikit-learn и создавалось web-приложение с использованием платформы Streamlit с открытым исходным кодом. Это web-приложение обладает простым пользовательским интерфейсом, позволяющим создавать прогнозы осложнений после операции у пациентов. *Результаты.* Был реализован пользовательский интерфейс с использованием библиотеки Streamlit для модели машинного обучения. *Выводы.* В результате были рассмотрены особенности реализации модели машинного обучения с использованием библиотеки Streamlit, разработки пользовательского интерфейса. В качестве примера использован набор данных прогнозирования послеоперационных осложнений.

Ключевые слова: машинное обучение, прогнозирование, послеоперационные осложнения, логистическая регрессия, k -ближайших соседей, дерево решений, метод опорных векторов, многослойный персептрон, случайный лес, Streamlit

Для цитирования: Кузнецова О. Ю., Кузнецов Р. Н., Кузьмин А. В. Особенности реализации модели машинного обучения для прогнозирования послеоперационных осложнений с использованием библиотеки Streamlit // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 167–176. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-12

INVESTIGATION MACHINE LEARNING MODEL USING STREAMLIT

O.Yu. Kuznetsova¹, R.N. Kuznetsov², A.V. Kuzmin³

^{1, 2, 3} Penza State University, Penza, Russia
¹ ellekasandra@yandex.ru, ² nahab007@rambler.ru, ³ a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* MLOps (Machine Learning Operations) is a relevant and important topic in the field of machine learning. It brings together the practices and processes needed to effectively develop, deploy, and manage machine learning models. *Materials and methods.* To predict complications after surgery, a Web-based user interface using Streamlit was developed. In this paper, the machine learning pipeline was applied using the Scikit-learn library and a Web application was created using the Streamlit platform, which is

open source. This web application has a simple interface for users that allows you to create forecasts of postoperative complications in patients. *Results.* The user interface was implemented using the Streamlit library for the machine learning model. *Conclusions.* As a result, the features of implementing a machine learning model using the Streamlit library and developing a user interface were considered. A data set for predicting postoperative complications was used as an example.

Keywords: machine learning, forecasting, prediction of postoperative complications, logistic regression, *k*-nearest neighbors, decision tree, support vector machine, multilayer perceptron, random forest, Streamlit

For citation: Kuznetsova O.Yu., Kuznetsov R.N., Kuzmin A.V. Investigation machine learning model using Streamlit. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(3):167–176. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-12

Введение

Основная актуальность MLOps (Machine Learning Operations) связана с растущим внедрением машинного обучения во многие отрасли, такие как финансы, здравоохранение, розничная торговля, производство и многое другое. Однако просто разработать модель машинного обучения недостаточно. Она также должна быть эффективно внедрена и поддерживаться [1–3].

Практика MLOps привносит модели ML в процесс производства. Это объединяет приложения ML с принципами DevOps (development and operations), где развертывание и обслуживание моделей ML могут быть автоматизированы в производственной среде [4, 5].

Набор инструментов MLOps упрощает управление жизненным циклом ML, обеспечивает надежность и быструю доставку. В этой работе были исследованы широко используемые на практике инструменты:

1. Kubeflow – это проект, созданный компанией Google. Позволяет создавать и масштабировать модели ML. Kubeflow обеспечивает управление моделями машинного обучения поверх Kubernetes, поддерживая этапы разработки, развертывания и мониторинга в течение всего жизненного цикла приложения машинного обучения через автоматизированные рабочие процессы [6]. Но в данном проекте отсутствуют функции управления версиями данных и управления версиями конвейера, что усложняет разработку.

2. MLflow – это не облачная платформа с открытым исходным кодом для управления сквозным жизненным циклом ML, выполняющая основные функции: отслеживание, проектирование, моделирование. MLflow обеспечивает возможность слежения за процессом ML, предоставляя пользователям функциональность для наблюдения за экспериментами, сравнения параметров и конечных результатов моделей ML через ведение записей и запросов всех вводимых и выводимых данных. Этот проект может служить инструментом для инкапсуляции кода ML [7]. Нет возможности развертывания облачной инфраструктуры.

3. DVC (Data Version Control) представляет собой инструмент, объединяющий управление версиями данных (DVC), непрерывное машинное обучение (CML) и поддерживающие сервисы для управления ML-моделями, наборами данных и экспериментами. Учет различных версий данных становится критически важным в процессе работы, особенно когда объем данных трудно обрабатываем. Кроме того, DVC обеспечивает эффективный совместный

обмен знаниями между командами [8]. В данном инструменте отсутствует возможность настройки гиперпараметров.

4. Streamlit является инструментом на Python, который упрощает и ускоряет создание веб-приложений. Его простота использования не требует сложных настроек. Streamlit обеспечивает возможность итеративного кодирования, при этом результаты можно наблюдать в реальном времени в процессе разработки. При помощи встроенного сервера пользователи могут немедленно развертывать свои приложения в вебе, прослеживая их функционирование через облачные сервисы Streamlit [10].

Целью работы является реализация процесса обучения конвейера машинного обучения с использованием библиотеки Scikit-learn и создания web-приложения с помощью платформы с открытым исходным кодом Streamlit по прогнозированию осложнений после операции на примере желчнокаменной болезни.

Материалы и методы

В исследовании использована анонимизированная выборка пациентов, страдающих желчнокаменной болезнью. Общее число пациентов в выборке составляет 109 человек, из которых 63 пациента не имеют осложнений, а 46 пациентов имеют осложнения. В рамках исследования были собраны данные о различных показателях здоровья у этих пациентов с желчнокаменной болезнью. Эта информация была использована для проведения анализа и изучения связей между этими параметрами и их возможным влиянием на наличие осложнений у пациентов с желчнокаменной болезнью [9]. Приложение машинного обучения было разработано в три этапа:

1. Построение модели машинного обучения (использовался случайный лес, прогнозирование послеоперационных осложнений).
2. Разработка web-интерфейса (библиотека Streamlit).
3. Развертывание web-приложения на платформе Streamlit.

Обычно процесс MLOps начинается с формулировки бизнес-задачи и исследования требований от специалистов в соответствующей области (рис. 1).

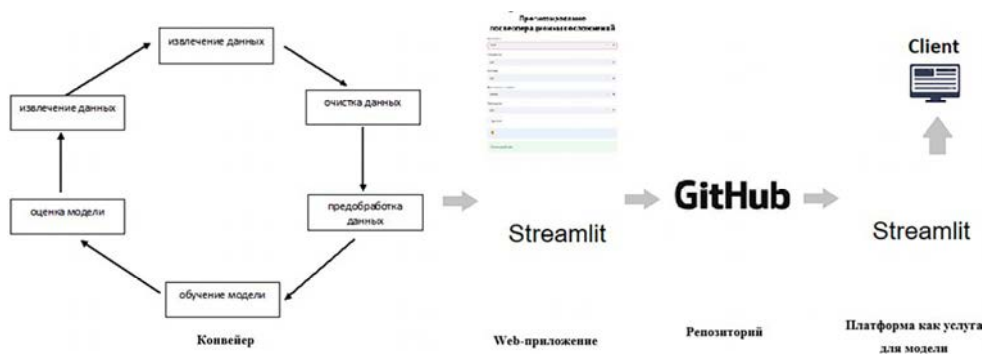


Рис. 1. Архитектура приложения для модели машинного обучения

На основе этих требований дизайнеры определяют тип моделей для разработки, учитывают необходимые функции и выбирают способ сбора данных и их доступность. Соответственно, на каждом из этих этапов для достижения

поставленных целей выполняются операции, такие как обработка данных и настройка модели ML с использованием библиотеки Scikit-learn. Следующей операцией является создание web-приложения для настроенной модели ML, в ней применяется библиотека Streamlit. Так как Streamlit также предоставляет платформу как услугу (PaaS), которая позволяет разрабатывать и развертывать web-приложения без необходимости управления инфраструктурой, web-приложение развертывалось именно на этой платформе. Для развертывания на платформе необходимые исходники кода ML были сохранены в репозитории GitHub. Наконец, пользователю необходима только ссылка на созданное web-приложение для осуществления тестирования пациентов.

Результаты

Первый этап включает серию шагов по предварительной обработке, отбору информативных показателей из входных данных, обучение модели машинного обучения для прогнозирования осложнений. Данные шаги были реализованы в пользовательском интерфейсе с использованием Streamlit [10–14]. Результаты представлены на рис. 2. Это библиотека для быстрой разработки пользовательского интерфейса (UI) для анализа данных и машинного обучения. Она позволяет создавать интерактивные приложения с минимальным количеством кода.

	Hemoglobin	Erythrocytes	Color_index	Leukocytes	Neutrophils	Neutrophils_segmented	Lymph
0	146	4.5	0.97	7.6	9	65	
1	141	4.5	0.94	8.7	2	70	
2	162	4.8	1	8.1	6	80	
3	162.1	4.8	1	9	12	78	
4	142.8	4.6	0.93	12.5	6	48	

Установите флажок на боковой панели, чтобы просмотреть набор данных.

Описание статистических данных

	Hemoglobin	Erythrocytes	Color_index	Leukocytes	Neutrophils	Neutrophils_segmented	Lymph
count	109	109	109	109	109	109	
mean	137.7743	4.3972	0.9341	8.5862	8.7339	62.6881	2
std	18.0734	0.4364	0.0428	4.0164	7.5273	8.676	1
min	69	2.5	0.82	3	1	39	
25%	128	4.3	0.91	5.4	3	58	
50%	140	4.5	0.93	7.5	6	64	
75%	149	4.6	0.97	10.3	11	69	
max	173	5.1	1	20.5	43	80	

Рис. 2. Описательная статистика данных

В данной работе использовался статистический тест χ^2 [15] для отбора показателей. Применялась библиотека Scikit-learn [16, 17], которая предоставляет класс SelectKBest, его можно использовать с набором различных

статистических тестов для выбора информативных показателей [16]. Результат работы данного алгоритма представлен на рис. 3.

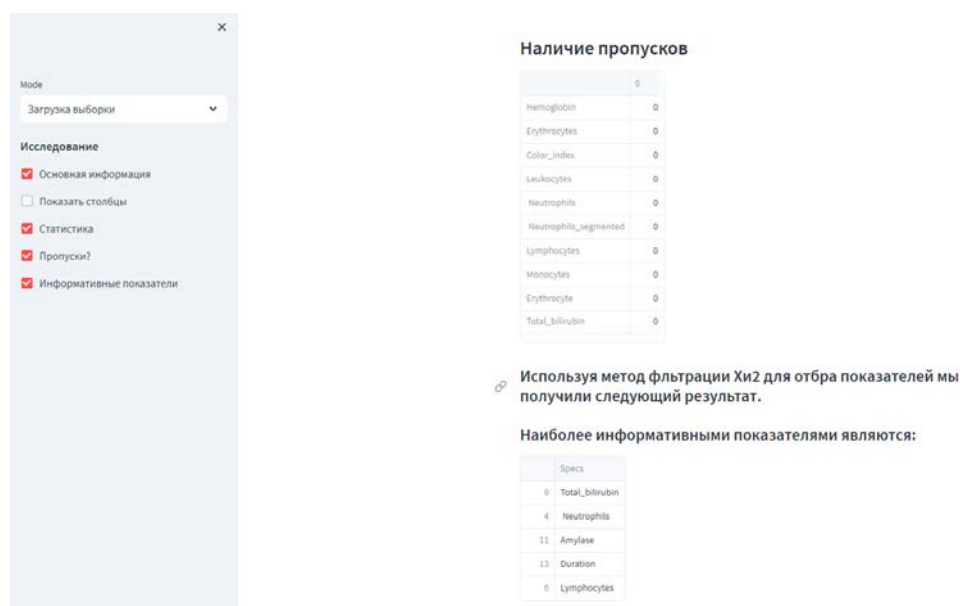


Рис. 3. Отбор информативных показателей

Последним шагом по этапу построение модели машинного обучения является выбор модели. Шесть различных моделей классификации можно протестировать на сайте для получения наилучшей точности прогнозирования послеоперационных осложнений (рис. 4).

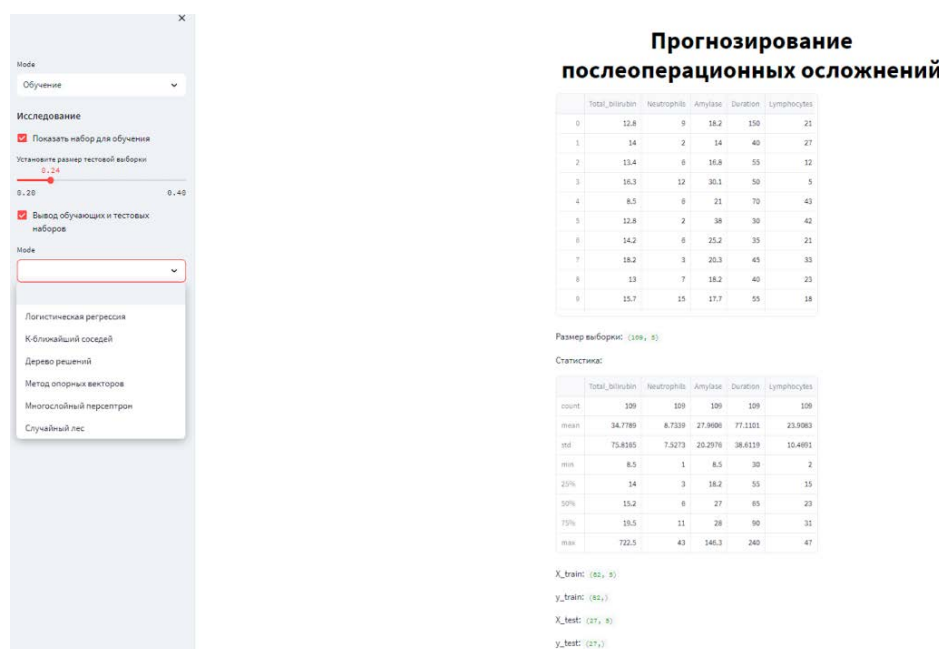


Рис. 4. Выбор модели машинного обучения

На рис. 4 показано, как можно настроить параметры для обучения, это размер тестовой выборки и сам метод обучения. После выбора метода происходит обучение и тестирование модели, также можно вывести матрицу неточности для оценки качества классификации.

На заключительном этапе пользователь может протестировать пациента на настроенной модели.

На рис. 5 показано, как проходит прогнозирование послеоперационных осложнений на новых данных. В зависимости от выбранного метода машинного обучения пользователь может протестировать пациента на разных моделях.

Билирубин

12,00 - +

Нейтрофилы

8,00 - +

Амилазе

9,00 - +

Длительность операции

100,00 - +

Лимфоциты

9,00 - +

Прогноз

😊

Осложнений нет

Рис. 5. Прогнозирование осложнений

Обсуждение

Результаты тестирования обученных моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка точности моделей

Модель	Точность
Логистическая регрессия	66,70
K-ближайших соседей	62,50
Дерево решений	66,70
Жесткий классификатор голосования	75,00
Многослойный персептрон	70,80
Случайный лес	83,30

Сравнение реализации различных классификаторов показало, что наиболее точный классификатор – случайный лес, это позволило повысить точность классификации до 83,30 %. Для реализации аналогичных моделей машинного обучения, представленных в [9], использовались модели с методом обучения жесткого классификатора голосования, модель машинного обучения на основе метода случайного леса дала более точный прогноз, чем жесткий классификатор голосования. Различия в точности модели связаны с различиями в реализации данных методов в библиотеке Scikit-learn.

Выводы

Был проведен обзор платформ альтернативных технологий для MLOps. Развертывание приложений на данных платформах связано с высокими затратами, а также некоторые платформы не предоставляют услуги пользователям из России.

В связи с этим развертывание web-приложений на платформе Streamlit становится актуальным по нескольким причинам. Во-первых, Streamlit предоставляет простой и удобный способ создания пользовательского интерфейса для web-приложений на основе Python. Во-вторых, Streamlit является платформой с открытым исходным кодом, что позволяет разработчикам адаптировать и расширять функциональность с помощью разработчиков сообщества. В-третьих, Streamlit обладает хорошей производительностью и масштабируемостью. Он может легко обрабатывать запросы от одного пользователя или от нескольких пользователей одновременно.

Реализован процесс обучения конвейера машинного обучения с использованием библиотеки Scikit-learn и создания web-приложения с помощью платформы с открытым исходным кодом Streamlit по прогнозированию осложнений после операции на примере желчнокаменной болезни, который позволил повысить точность классификации до 83,30 %.

Список литературы

1. Lathkar M. High-Performance Web Apps with FastAPI: The Asynchronous Web Framework Based on Modern Python. Nanded, Maharashtra, India, 2023. P. 1–309.
2. Singh P. Deploy Machine Learning Models to Production. 2021. P. 1–150.
3. Lane K. The Design of Web APIs. NY : Shelter Island, 2019. P. 1–355.
4. Kreuzberger D., Kühl N., Hirschl S. Machine Learning Operations (MLOps): Overview, Definition, and Architecture // IEEE Access. 2023. January. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3262138
5. Clin J. A Comparative Study of Machine Learning Algorithms in Predicting Severe Complications after Bariatric Surgery // The Future of Artificial Intelligence in Clinical Medicine. 2019. Vol. 668, iss. 8 (5). P. 1–27.
6. Документация платформы Kubernetes. URL: <https://www.kubeflow.org/docs> (дата обращения: 12.05.2023).
7. Документация платформы MLflow. URL: <https://mlflow.org/docs/latest/index.html> (дата обращения: 12.05.2023).
8. Документация платформы DVC. URL: <https://dvc.org> (дата обращения: 12.05.2023).
9. Кузнецов Р. Н., Кузнецова О. Ю. Анализ ансамблевых методов классификации для прогнозирования послеоперационных осложнений у больных желчно-

- каменной болезнью // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. XXII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 9–10 декабря 2022 г.). Пенза : Приволжский Дом знаний, 2022. С. 83–86.
10. Raghavendra S. *Beginner's Guide to Streamlit with Python: Build Web-Based Data and Machine Learning Applications*. Dharwad, Karnataka, India, 2023. P. 1–203.
11. Khorasani M. *Web Application Development with Streamlit: Develop and Deploy Secure and Scalable Web Applications to the Cloud Using a Pure Python Framework*. 2022. P. 1–480.
12. Shukla S., Maheshwari A., Johri P., Comparative Analysis of ML Algorithms & Streamlit Web Application // 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking. Greater Noida, India, 2021. P. 175–180.
13. Parker A., Heflin A., Jones L. C. Analyzing University of Virginia Health publications using open data, Python, and Streamlit // *Journal of the Medical Library Association*. 2021. Vol. 109 (4). P. 688–689. doi: 10.5195/jmla.2021.1360. PMID: 34858105; PMCID: PMC8608219
14. Gopiseti L. D., Kummera S. K. L., Pattamsetti S. R. [et al.]. Multiple Disease Prediction System using Machine Learning and Streamlit // 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT). Tirunelveli, India, 2023. P. 923–931.
15. Горбаченко В. И., Кузнецов Р. Н., Кузнецова О. Ю. Отбор информативных признаков для прогнозирования послеоперационных осложнений при желчнокаменной болезни // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. науч. ст. по материалам XVI Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2016. С. 91–97.
16. Документация библиотеки Scikit-learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (дата обращения: 12.05.2023).
17. Документация библиотеки Streamlit. URL: <https://docs.streamlit.io/library/get-started/main-concepts> (дата обращения: 12.05.2023).

References

1. Lathkar M. *High-Performance Web Apps with FastAPI: The Asynchronous Web Framework Based on Modern Python*. Nanded, Maharashtra, India, 2023:1–309.
2. Singh P. *Deploy Machine Learning Models to Production*. 2021:1–150.
3. Lane K. *The Design of Web APIs*. NY: Shelter Island, 2019:1–355.
4. Kreuzberger D., Kühl N., Hirschl S. Machine Learning Operations (MLOps): Overview, Definition, and Architecture. *IEEE Access*. 2023;January. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3262138
5. Clin J. A Comparative Study of Machine Learning Algorithms in Predicting Severe Complications after Bariatric Surgery. *The Future of Artificial Intelligence in Clinical Medicine*. 2019;668(8):1–27.
6. *Dokumentatsiya platformy Kubernetes = Kubernetes platform documentation*. (In Russ.). Available at: <https://www.kubeflow.org/docs> (accessed 12.05.2023).
7. *Dokumentatsiya platformy MLflow = MLflow platform documentation*. (In Russ.). Available at: <https://mlflow.org/docs/latest/index.html> (accessed 12.05.2023).
8. *Dokumentatsiya platformy DVC = DVC platform documentation*. (In Russ.). Available at: <https://dvc.org> (accessed 12.05.2023).
9. Kuznetsov R.N., Kuznetsova O.Yu. Analysis of ensemble classification methods for predicting postoperative complications in patients with gallstone disease. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. st. XXII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 9–10 dekabrya 2022 g.) = Problems of informatics in education, management, economics and technology : collection of articles XXII*

- International scientific and technical. conf. (Penza, December 9–10, 2022). Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2022:83–86. (In Russ.)*
10. Raghavendra S. *Beginner's Guide to Streamlit with Python: Build Web-Based Data and Machine Learning Applications*. Dharwad, Karnataka, India, 2023:1–203.
 11. Khorasani M. *Web Application Development with Streamlit: Develop and Deploy Secure and Scalable Web Applications to the Cloud Using a Pure Python Framework*. 2022:1–480.
 12. Shukla S., Maheshwari A., Johri P., Comparative Analysis of ML Algorithms & Stream Lit Web Application. *3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking*. Greater Noida, India, 2021:175–180.
 13. Parker A., Heflin A., Jones L. C. Analyzing University of Virginia Health publications using open data, Python, and Streamlit. *Journal of the Medical Library Association*. 2021;109(4):688–689. doi: 10.5195/jmla.2021.1360. PMID: 34858105; PMCID: PMC8608219
 14. Gopiseti L.D., Kummera S.K.L., Pattamsetti S.R. et al. Multiple Disease Prediction System using Machine Learning and Streamlit. *5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*. Tirunelveli, India, 2023:923–931.
 15. Gorbachenko V.I., Kuznetsov R.N., Kuznetsova O.Yu. Selection of informative signs for predicting postoperative complications in cholelithiasis. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. nauch. st. po materialam XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of informatics in education, management, economics and technology : collection of scientific articles based on the materials of the XVI international scientific-technical conf.* Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2016:91–97. (In Russ.)
 16. *Dokumentatsiya biblioteki Scikit-learn = Documentation of the library Scikit-learn.* (In Russ.). Available at: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (accessed 12.05.2023).
 17. *Dokumentatsiya biblioteki Streamlit = Documentation of the Streamlit library.* (In Russ.). Available at: <https://docs.streamlit.io/library/get-started/main-concepts> (accessed 12.05.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Юрьевна Кузнецова

кандидат технических наук,
доцент кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ellekasandra@yandex.ru

Olga Yu. Kuznetsova

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Роман Николаевич Кузнецов

начальник управления информатизации,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nahab007@rambler.ru

Roman N. Kuznetsov

Head of the department of informatization,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Викторович Кузьмин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Andrey V. Kuzmin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 03.07.2023

Поступила после рецензирования/Revised 11.08.2023

Принята к публикации/Accepted 05.09.2023