

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (45)

2023

---

## СОДЕРЖАНИЕ

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

<i>Толстых Т. О., Шмелева Н. В., Гамидуллаева Л. А., Краснобаева В. С.</i> РОЛЬ КОЛЛАБОРАЦИИ В РАЗВИТИИ ИНТЕГРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	5
<i>Балахонова Е. В.</i> ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ УМНЫХ ГОРОДОВ КАК НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ .....	37
<i>Сергеева И. А., Тактарова С. В., Сергеев А. Ю.</i> МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ И МЕРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ.....	56
<i>Шмелева Н. В.</i> МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РЕСУРСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ .....	70
<i>Шкарунета Е. В.</i> ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЕ КОНСТРУКТЫ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО СТРАТЕГИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ .....	85

## РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

<i>Фролов С. В., Савинова К. С., Ильин Г. П., Ветров А. Н.</i> РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ .....	100
<i>Иващенко А. В., Александрова М. В.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ИММЕРСИВНОЙ СРЕДЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ГЛУБИНОЙ ПОГРУЖЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИЯХ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ .....	111
<i>Мельник О. В., Саблина В. А., Черненко А. Д.</i> РАСПОЗНАВАНИЕ МИКРОВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАССИФИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	125
<i>Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И.</i> АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПАССАЖИРОВ.....	136
<i>Полозов А. А., Штарк М. П., Полозова К. А., Мальцева Н. А., Ахметзянов А. Р.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ХАРАКТЕРА ЛИЧНОСТИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ НА ПРИМЕРЕ МЕТОДИКИ ММРІ.....	149
<i>Безбородова О. Е.</i> ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА И ОБЪЕКТА ТЕХНОСФЕРЫ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА .....	164
<i>Геращенко С. М., Демидов А. В., Зюлькина Л. А.</i> РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТКАНЕЙ ПАРОДОНТА В ПОСТОПЕРАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ .....	178

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

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1 (45)

2023

---

## CONTENT

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

- Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Gamidullaeva L.A., Krasnobaeva V.S.*  
THE ROLE OF COLLABORATION IN THE DEVELOPMENT  
OF INDUSTRIAL ENTERPRISES INTEGRATION .....5
- Balakhonova E.V.*  
INNOVATIVE DEVELOPMENT OF SMART CITIES  
AS A NECESSARY CONDITION FOR ACHIEVING  
THE GOALS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT .....37
- Sergeeva I.A., Taktarova S.V., Sergeev A.Yu.*  
METHODOLOGY FOR ASSESSING THE LEVEL  
AND MEASURES TO ENSURE THE ECONOMIC  
SECURITY OF THE ENTERPRISE .....56
- Shmeleva N.V.*  
METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING  
THE RESOURCE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL ECOSYSTEMS .....70
- Shkarupeta E.V.*  
TERMINOLOGICAL CONSTRUCTS OF THE CONCEPT  
OF DIGITAL STRATEGIZING OF INDUSTRIAL SYSTEMS .....85

## SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

<b><i>Frolov S.V., Savinova K.S., Ilyin G.P., Vetrov A.N.</i></b> THE USE OF EFFECTIVE ON-OFF CONTROL SYSTEMS FOR MEDICAL EQUIPMENT TASKS .....	100
<b><i>Ivaschenko A.V., Aleksandrova M.V.</i></b> DEVELOPMENT OF IMMERSIVE ENVIRONMENT WITH CONTROLLED DEPTH PERCEPTION IN AUGMENTED REALITY APPLICATIONS .....	111
<b><i>Melnik O.V., Sablina V.A., Chernenko A.D.</i></b> FACIAL MICRO-EXPRESSION RECOGNITION USING CLASSIFIERS BASED ON MACHINE LEARNING METHODS.....	125
<b><i>Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I.</i></b> ARCHITECTURE OF THE PASSENGER CLUSTERING SYSTEM ....	136
<b><i>Polozov A.A., Shtark M.P., Polozova K.A., Maltseva N.A., Akhmetzyanov A.R.</i></b> DETERMINING OF PERSON'S CHARACTER TYPE BY CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK (USING THE MMPI METHODOLOGY).....	149
<b><i>Bezborodova O.E.</i></b> SIMULATION MODELING OF THE INTERACTION OF A HUMAN AND AN OBJECT OF TECHNOGENICS ON THE BASIS OF RISK .....	164
<b><i>Gerashchenko S.M., Demidov A.V., Zyulkina L.A.</i></b> DEVELOPMENT OF THE HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR NON-INVASIVE EXPRESS DIAGNOSTICS OF THE STATES OF PERIODONTAL TISSUES IN THE POST-OPERATIVE PERIOD .....	178

# Раздел 1 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

## Section 1 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

---

УДК 338.2.2  
doi:10.21685/2227-8486-2023-1-1

### РОЛЬ КОЛЛАБОРАЦИИ В РАЗВИТИИ ИНТЕГРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Т. О. Толстых<sup>1</sup>, Н. В. Шмелева<sup>2</sup>,  
Л. А. Гамидуллаева<sup>3</sup>, В. С. Краснобаева<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 4</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва, Россия

<sup>3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>tt400@mail.ru, <sup>2</sup>nshmeleva@misis.ru, <sup>3</sup>gamidullaeva@gmail.com,

<sup>4</sup>krasnobaeva.viktoria@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Организационно-управленческие модели объединения экономических агентов на основе партнерства и взаимной выгоды могут стать «окном возможностей» для предприятий, которым требуется одновременно решать задачи по экономической выживаемости, технологической независимости и соблюдению принципов устойчивого развития. Несмотря на повышенный интерес академического сообщества к данной проблеме, следует признать недостаточную разработанность вопросов операционализации данных моделей на практике, выявления ключевых факторов, лежащих в основе формирующих эти модели сложноорганизованных взаимодействий. *Материалы и методы.* Теоретико-методологической основой исследования служат труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные проблеме интеграции предприятий на отраслевом и межотраслевом уровнях, включая работы, связанные с изучением экосистемного подхода в экономике. Исследование проводилось с использованием общенаучных методов, в числе которых методы наблюдения, описания, анализа, синтеза, индукции, сравнения, классификации, а также специальных методов: экспертный опрос, экономический анализ, статистический и др. *Результаты.* Авторы выделили этапы эволюции межорганизационных связей (координация, интеграция, кооперация и коллаборация) и соотнесли их с различными моделями горизонтального объединения предприятий (от отраслевых союзов до инновационных промышленных экосистем). Обосновано, что в качестве критерия объединения предприятий в инновационные промышленные экосистемы следует рассматривать уровень их коллаборативной зрелости. Предложен подход к анализу потенциалов предприятий с позиции коллаборативной зрелости и оценке их на предмет возможности формирования промышленных инновационных экосистем. Предложения авторов

---

© Толстых Т. О., Шмелева Н. В., Гамидуллаева Л. А., Краснобаева В. С., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

апробированы в двух кейсах: при оценке коллаборативной зрелости участников промышленного симбиоза по переработке фосфогипса, а также при оценке коллаборативной зрелости акторов промышленной инновационной экосистемы «Безопасные фосфаты». *Выводы.* Горизонтальная интеграция промышленных предприятий развивается эволюционно на основе повышения уровня коллаборативной зрелости каждого из акторов.

**Ключевые слова:** промышленный кластер, инновационные сети, инновационная промышленная экосистема, интеграция, коллаборация, подход к оценке, межорганизационные связи

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 23-28-01548 (URL: <https://rscf.ru/project/23-28-01548>).

**Для цитирования:** 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

## THE ROLE OF COLLABORATION IN THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES INTEGRATION

T.O. Tolstykh<sup>1</sup>, N.V. Shmeleva<sup>2</sup>,  
L.A. Gamidullaeva<sup>3</sup>, V.S. Krasnobaeva<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 4</sup> National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

<sup>3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>tt400@mail.ru, <sup>2</sup>nshmeleva@misis.ru, <sup>3</sup>gamidullaeva@gmail.com,

<sup>4</sup>krasnobaeva.viktoria@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Organizational and managerial models for corporate merger based on partnership, mutual benefit and synergy can become a "window of opportunity" for enterprises that need to simultaneously solve the problems of economic survival, technological independence and compliance with the principles of sustainable development. Despite the increased interest of the academic community in this problem, it should be recognized that the issues of operationalizing these models in practice and identifying the key factors underlying the complex interactions that form these models should be recognized as insufficiently developed. *Materials and methods.* The theoretical and methodological basis of the study are the works of domestic and foreign scientists devoted to the problem of integration of enterprises at the sectoral and intersectoral levels, including works related to the study of the ecosystem approach in the economy. The study was conducted using general scientific methods, including methods of observation, description, analysis, synthesis, induction, comparison, classification, as well as special methods: expert survey, economic analysis, statistical and others. *Results.* The authors identified stages of the evolution of inter-organizational relations (coordination, integration, cooperation and collaboration) and correlated them with various models of horizontal association of enterprises (from industry unions to innovative industrial ecosystems). It is substantiated that the level of their collaborative maturity should be considered as a criterion for combining enterprises into innovative industrial ecosystems. This article proposes an approach to analyzing the potentials of enterprises in terms of collaboration maturity and evaluation thereof for the potential formation of industrial innovation ecosystems. The authors' proposals have been tested when assessing collaboration maturity of the participants in the industrial symbiosis for phosphogypsum recycling, as well as when assessing collaboration maturity of the actors in Safer Phosphates industrial innovation ecosystem. *Conclusions.* The horizontal integration of industrial enterprises develops evolutionarily based on an increase in the level of collaborative maturity of each of the actors.

**Keywords:** industrial cluster, innovation networks, innovative industrial ecosystem, integration, collaboration, assessment approach, interorganizational communications

**Acknowledgments:** the study has been supported by the grant from the Russian Science Foundation (RSF), project № 23-28-01548 (URL: <https://rscf.ru/project/23-28-01548>).

**For citation:** Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Gamidullaeva L.A., Krasnobaeva V.S. The role of collaboration in the development of industrial enterprises integration. *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

### **Введение**

В связи с целым рядом геополитических, технологических и экономических вызовов, порожденных санкциями, которые привели к увеличению дефицита материально-сырьевых ресурсов, нарушению логистических связей, к энергетическим и структурным кризисам, положение промышленных компаний на рынке становится менее устойчивым, в приоритете становятся вопросы выживаемости, а стратегии развития приобретают второстепенный характер. Снижение инновационной активности, замедление реализации «зеленых» проектов и отказ от ESG-повестки может отразиться на перекладывании последствий кризиса предприятий промышленного сектора на конечных потребителей. Представители промышленности могут оказаться в высокой зависимости от дотационной политики государства, что в долгосрочной перспективе приведет к снижению самостоятельности и устойчивости как отдельных отраслей, так и национальной экономики.

При этом современными и ключевыми мировыми вызовами по-прежнему остаются вопросы снижения негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), ответственного производства и потребления ресурсов.

И в этих условиях предприятиям необходимо искать новые методы и модели, позволяющие предотвратить стагнацию и обеспечить конкурентоспособный технологический и экологический уровень развития, осуществить возврат к более ресурсоэффективным и экологичным моделям производства, провести модернизацию действующих промышленных производств через снижение ресурсоемкости технологических процессов.

Сейчас перечисленные направления развития являются труднореализуемыми ввиду следующих обстоятельств:

- самостоятельный поиск или разработка технологических решений являются высокочувствительными для отдельных предприятий (необходимо разделение финансового бремени);
- рост стоимости добычи или покупки исходного сырья делает процесс производства менее рентабельным (при использовании более дешевого сырья или альтернатив зачастую необходимо перестроение производственных процессов, что может отразиться на качестве производимого продукта);
- стремительное развитие зарубежных конкурентов, введенный порог по углеродным выбросам значительно снижают конкурентоспособность отечественных промышленных предприятий на мировом рынке;
- уход зарубежных представителей и поставщиков нарушил производственные процессы (произошло подорожание логистических услуг; поиск

заменителей или создание собственных аналогов импортируемых товаров требует дополнительных инвестиций и времени).

Одним из решений по преодолению вышеперечисленных ограничений и формированию собственного курса долгосрочного и устойчивого развития может стать политика создания промышленных симбиозов по принципу реализации наилучших доступных технологий (НДТ). Цель промышленного симбиоза – соединить разные компании, чтобы использовать отходы одной как ресурс для другой. Избыток энергии, излишки ингредиентов или материалов в одной отрасли могут стать ресурсами для другой. Такое взаимовыгодное объединение приводит к повышению эффективности производства, снижению себестоимости продукции, увеличению конкурентных преимуществ каждого участника.

Важно подчеркнуть актуальность данного исследования в контексте приоритетных направлений трансформации промышленной политики России, в том числе вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот.

Несмотря на повышенный интерес академического сообщества к данной проблеме, следует признать недостаточную разработанность вопросов операционализации этих моделей на практике, выявления ключевых факторов, лежащих в основе сложных взаимодействий, образующих эти модели.

В данной статье предлагается концептуальный подход, содержащий методологические основания для оценки уровня готовности участников интеграционных взаимодействий к переходу от более простых форм горизонтального взаимодействия (ассоциации, альянсы, технопарки и др.) к более сложным интеграционным связям в рамках промышленных симбиозов и инновационных экосистем. При этом, по мнению авторов, критерием оценки должен стать уровень «коллаборативной зрелости» акторов, подход к оценке которой предлагается авторами в данной статье.

Остальная часть этой статьи организована следующим образом. Обзор литературы по проблеме исследования и разработанная исследовательская гипотеза представлены в разделе 2. Раздел 3 раскрывает методологию оценки акторов для включения в промышленные симбиозы и инновационные экосистемы. Проиллюстрирована система показателей для оценки симбиотического потенциала компаний, разработана матрица зрелости сотрудничества акторов. Предлагается алгоритм реализации, выявляются ограничения и допущения предлагаемого методологического подхода. Далее предложения авторов апробируются на примерах двух кейсов (разделы 4-5). Раздел 5 содержит основные результаты, теоретический и практический вклад проведенного исследования.

### ***Разработка гипотезы и обзор литературы***

Экологические, технологические и цифровые тренды, охватившие современный мир, диктуют необходимость оценки существующих бизнес-моделей и поиск новых форм, оптимальных экономической реальности. Последние несколько десятилетий в научной литературе активно обсуждаются сетевые формы объединения предприятий как наиболее продуктивные, перспективные и гибкие к отражению внешних и внутренних вызовов. Майкл Портер писал о том, что экономический рост в промышленных сетевых объединениях связан с развитием межорганизационной коллаборации и с привлечением в сети таких акторов, как научные организации, органы власти и различные стейкхолдеры [1]. Исследователи К. Мейсон и М. Спринг обосновывали в своих трудах,

что сетевая бизнес-модель выступает новой формой взаимодействия технологий и рыночных возможностей [2]. Р. Кумбс и Ж. Николсон также доказывали, что сетевые бизнес-модели, ориентированные на создание стоимости между заинтересованными сторонами, являются новым явлением в организационном моделировании [3]. Р. Майлс и Ч. Сноу предложили различные классификации сетевых моделей по степени устойчивости связей, направлению интеграции, масштабу входящих в сеть предприятий и другим критериям [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что ключевым фактором в сетевых формах организаций в противовес соперничеству и конкуренции выступают сотрудничество, взаимная заинтересованность и партнерство.

**Гипотеза исследования** – горизонтальная интеграция промышленных предприятий развивается эволюционно на основе повышения уровня коллаборативной зрелости каждого из акторов.

С. Клот выделяет следующие формы межорганизационного сотрудничества: независимость, координация, сотрудничество, коллаборация, интеграция [5]. Считаем, что данная классификация может быть положена в основу отражения зрелости компаний с точки зрения их стратегических целей к межорганизационному взаимодействию (рис. 1).

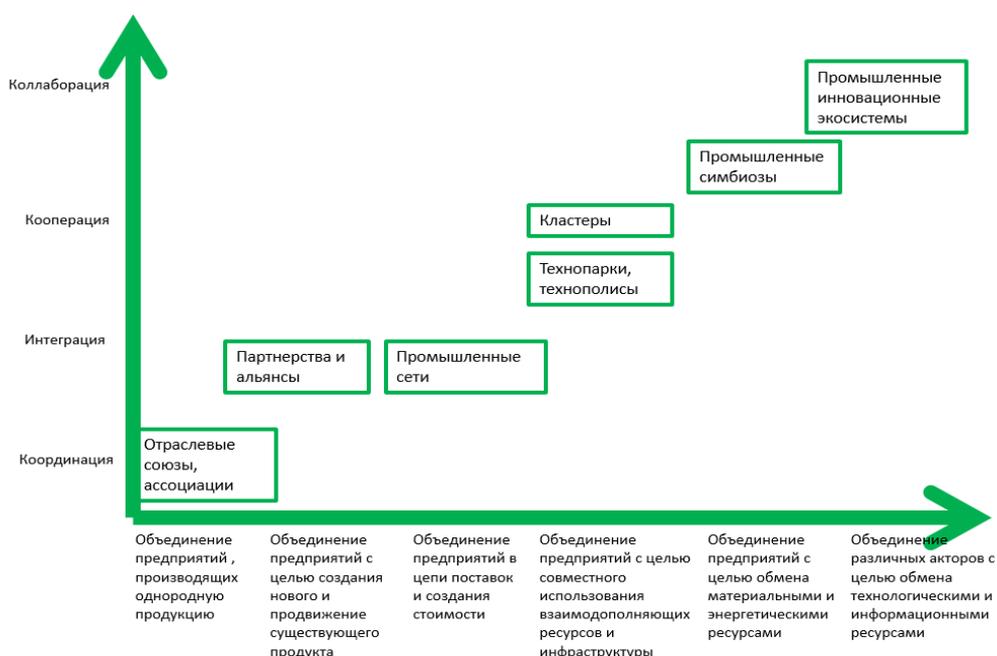


Рис. 1. Степень межорганизационного взаимодействия в моделях горизонтальных объединений предприятий

Этап независимости компаний связан с этапом ориентации на соперничество. Безусловно, предприятия могут совместно выполнять какие-то разовые работы, но межорганизационная культура не достигла уровня, позволяющего формировать сотрудничество на принципах взаимного доверия, поэтому на рисунке данный этап развития сотрудничества отсутствует.

Таким образом, начальным этапом межорганизационного взаимодействия является **координация**. На данном этапе предприятия одной отрасли

взаимодействуют в формате отраслевых союзов и ассоциаций, обеспечивая регулирование деятельности отрасли с позиции представления индивидуальных интересов, сохраняя при этом стратегическую независимость.

Следующий этап развития сотрудничества – **интеграция**, когда формируется механизм взаимодействия предприятий, позволяющий сохранить независимость, но при этом взаимодействовать для достижения общей цели. В отличие от предыдущего этапа, у объединения предприятий есть единая цель. К такому сотрудничеству можно отнести партнерство и различные альянсы в рамках одной отрасли. К интеграции также можно отнести и промышленные сети, когда рыночный механизм взаимоотношений заменяется внутрихозяйственными операциями. Этот этап характеризуется высокой конкуренцией за ограниченные ресурсы и нехваткой средств на поиск новых идей. Объединение предприятий в рамках интеграции в большей степени является вынужденным, а не добровольным решением.

**Кооперации** – это форма сотрудничества двух или более предприятий с одной отрасли и/или территории, когда каждое предприятие, сохраняя свои границы и интересы, выполняет обязательства в рамках сотрудничества для достижения общего результата. Этот этап межорганизационного взаимодействия характерен для формирования кластеров, технополисов и технопарков. Связь предприятий на этом этапе, как правило, основана на принадлежности к территории и/или отрасли. Предприятия объединяются технологически с целью региональной или отраслевой стратегии инновационного развития [6]. Как правило, инициация объединения на данном этапе является инициативой не самих предприятий, а решением в рамках стратегического управления региона или отрасли [7]. Но при этом в межорганизационном взаимодействии начинают играть роль факторы доверия и личных связей.

Высшим проявлением сотрудничества предприятий, по нашему мнению, является **этап коллаборации**. Коллаборацию можно определить как новую интерактивную форму кооперации в глобальной среде экономики знаний для получения продуктовых и процессных инноваций. При коллаборации партнеры, имеющие различные мнения относительно одной и той же проблемы, могут конструктивно подходить к разногласиям и находить решения, которые выходят за рамки индивидуального видения каждого партнера [8, 9]. Акторы коллаборации добровольно на принципах доверия совместно разделяют контроль и ответственность, распределяют финансовую ответственность и риски, согласовывают интересы и действия, что позволяет создавать значительный синергетический эффект.

Переход от кооперации к коллаборации, безусловно, демонстрируют такие объединения предприятий, как промышленные симбиозы. Промышленный симбиоз представляет собой форму межорганизационных отношений, отражающих принципы экономики замкнутого цикла [10, 11], когда излишние или побочные продукты одних производств становятся ресурсами для других, а обмен осуществляется на основе партнерских отношений с целью повышения конкурентных преимуществ. Объединение компаний на основе симбиотических связей для обеспечения циркуляции побочных ресурсов ориентировано на сведение к минимуму потребления первичных ресурсов и количества образующихся отходов [12–14]. Однако создание циклического обращения ресурсов трудно реализуемо в рамках одного предприятия, так как формируемые

побочные ресурсы или отходы либо не применимы к текущим технологическим процессам, либо требуют реализации новых видов деятельности. Исследованию промышленных симбиозов посвящено множество трудов современных ученых, однако общепризнанная трактовка еще не сформулирована. Каждый автор давал определение термину со стороны собственного направления исследования. Так, португальские ученые считают, что промышленный симбиоз – это подобласть экономики замкнутого цикла, который характеризуется многочисленными связями по обмену ресурсами как между, так и внутри отдельных предприятий [10]. В работе [15] промышленные симбиозы описаны как платформы, предназначенные для обмена отходами между промышленными предприятиями. Авторы предложили модель по оценке промышленных симбиозов, которая включает идентификацию сетевых соединений, оценку жизненного цикла ресурсов, экономическую оценку и экологические характеристики. В статье испанских исследователей [12] промышленный симбиоз характеризуется как модель промышленной экологии, где фундаментальным аспектом является сотрудничество и синергия, которые могут существовать между различными видами экономической деятельности в результате обмена и совместного использования ресурсов. Промышленный симбиоз вовлекает традиционно отдельные отрасли в коллективный подход к созданию конкурентных преимуществ, включая физический обмен материалами, энергией, водой и/или побочными продуктами [16].

Некоторые исследователи связывают создание симбиозов с повышением эффективности использования ресурсов через модель экономики замкнутого цикла, когда отходы одной компании служат ресурсом для другой. Так, Чока и соавторы [17] считают, что промышленный симбиоз представляет собой новую бизнес-модель, в которой используются ресурсы, которые ранее считались отходами производства. Авторы отметили, что страны с высоким уровнем качества жизни используют данную модель и достигают более эффективного распоряжения ресурсами, имеют более инновационные схемы производства при меньших финансовых затратах и меньшем негативном воздействии на окружающую среду. Объединение предприятий в промышленные симбиозы является инициативой самих компаний как результат экологической, инновационной и технологической зрелости менеджмента компаний.

Наконец, на самой высшей ступени межорганизационных отношений на современном этапе находятся промышленные инновационные экосистемы. Коллаборация в экосистемах не ограничивается рамками территорий или отраслей, а объединяет разных акторов на принципах самоорганизации и самоуправления, взаимного доверия, устойчивого развития и открытых инноваций. В экосистемах реализуется обмен знаниями и информацией, действует коллективное обучение, развивается система взаимосвязанных технологий, что способствует развитию как каждого актора экосистемы, так и общества в целом. Для создания и роста экосистемы необходимо, прежде всего, создание ценности, обладающей стоимостью, а также механизм распределения этой ценности на основе диффузии инноваций и спилловер-эффектов.

Авторы достаточно подробно описали свое видение промышленных инновационных экосистем в предыдущих исследованиях [18–20]. Обобщая вышеизложенное, эволюцию моделей сетевого взаимодействия предприятий в зависимости от их коллаборативной зрелости можно представить графически (рис. 2).



Рис. 2. Эволюция моделей горизонтального объединения предприятий (составлено авторами)

В данной статье предлагается подход к анализу потенциалов предприятий и акторов с позиции коллаборативной зрелости и оценке их на предмет возможности формирования промышленных симбиозов и в дальнейшем промышленных инновационных экосистем.

### *Методология исследования*

Для оценки возможности создания симбиозов необходимо учитывать как общие тренды современного устойчивого развития, так и интересы и возможности потенциальных участников, а также их готовность к формированию коллаборативных связей.

На сегодняшний день существует несколько классификаций симбиозов по следующим признакам:

- по уровню взаимодействия: мезо-, микро-, макроуровень [7, 12];
- по типам перемещения ресурсов: внутриорганизационная циркуляция ресурсов (когда отходы повторно используются в рамках одного предприятия), внешний обмен ресурсами между промышленными компаниями (на основе партнерских отношений) и реализация остатков или отходов производства на рынке (как сырье для последующей переработки или использования) [10];
- по виду циркулирующих ресурсов: энергия, вода, остаточные материалы [21].

Коллаборативную зрелость предприятий с позиции формирования симбиозов предлагаем оценивать по реализуемым ими совместным проектам. Количество и качество совместных проектов в технологической и экологической сферах характеризует, с нашей позиции, уровень коллаборативности (связей) предприятия. Одним из критериев оценки таких проектов может стать

концепция наилучших доступных технологий как показатель управленческой зрелости компаний (рис. 3).

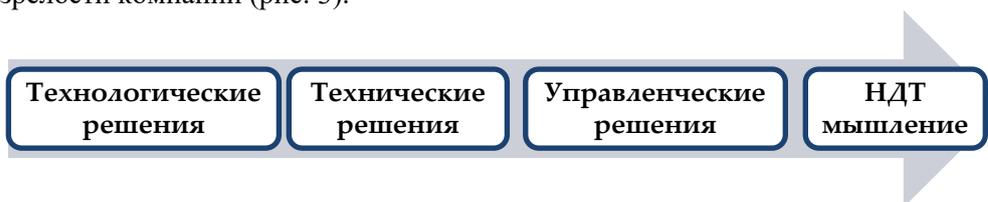


Рис. 3. Системное содержание НДТ (составлено авторами)

Именно единое мировоззренческое понимание необходимости повышения ресурсной и экологической эффективности, важности реализации проектов по технологической модернизации, стремление к совместному поиску оптимальных технических решений, а также технологическая возможность одного из партнеров использовать побочные продукты другого должны стать стимулами в формировании промышленного симбиоза.

Наилучшие доступные технологии концептуально, через систему идей, ценностей и принципов, формируют подход к технологической модернизации основных процессов предприятия через рациональное использование ресурсов, глубокую переработку сырья, эффективное потребление энергии.

Исследование роли и значения НДТ в практике предприятий отражено в трудах Д. О. Скобелева [22], где концепция НДТ рассмотрена как одно из направлений экологической промышленной политики по повышению ресурсной и экологической эффективности. Структуру НДТ Д. Скобелев представляет как систему из трех компонентов, влияющих на все этапы жизненного цикла предприятия:

- «наилучшие» – определяет инновационную модернизацию, природоохранную направленность и рациональное потребление ресурсов;
- «доступные» – определяет экономическую целесообразность и техническую доступность;
- «технологии» – отражают методы, инструменты и механизмы реализации.

Научный коллектив в работе [23] рассматривает систему нормативного регулирования негативного воздействия на окружающую среду на основе принципов НДТ также для вторичных источников загрязнений. Авторы предложили инструментарий выбора НДТ для снижения эксплуатационных затрат и повышения ресурсной эффективности, а также методы регулирования малых и средних предприятий через нормы общего действия в связи с необходимостью контроля второстепенного воздействия на ОС и регулирования всех участников рынка.

Предлагаемые в статье подходы к оценке коллаборативной и инновационной зрелости предприятий для формирования промышленных симбиозов и промышленных инновационных экосистем базируются на принципах построения сбалансированной системы показателей, разработанной Капланом и Нортоном [24] и методе аналитических иерархий Томаса Л. Саати [25].

На рис. 4 представлена обобщенная структура оценки потенциала предприятий.



Рис. 4. Направления оценки возможности создания симбиоза предприятий (составлено авторами)

Оценка стремления участников к сотрудничеству отражает степень коллаборативной зрелости предприятий, их активность, согласованность и готовность к сотрудничеству. Эффективность использования энергии, материалов, сырья и прочих ресурсов компаний предлагается оценивать на основе таких показателей, как:

- рациональное потребление ресурсов (расход энергии, сырья, материалов и пр.);
- экологическое воздействие (образование отходов при производстве в виде твердых отходов, выбросов в атмосферу или сточных вод, шума);
- экономический эффект (повышение показателей коммерческой составляющей, устойчивости предприятия на рынке);
- улучшение инновационно-технологических показателей (совершенствование системы менеджмента, повышение производительности, инновационная ориентированность);
- «дружелюбность» производства к окружающей среде;
- снижение экологических рисков.

Концепция сбалансированных показателей взята за основу как методология подхода. Но в отличие от классического представления в статье предлагается рассматривать направления, отражающие принципы экономики замкнутого цикла (рис. 5).

1.1 Экономический	1.2 Циркулярный	1.3 Социально-экологический	1.4 Инновационно-технологический
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Оценка экономической устойчивости</li> <li>• Оценка устойчивости прибыли</li> <li>• Динамика активов и обязательств</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Степень вовлечения вторичных ресурсов</li> <li>• Доступность ресурсов для реализации этапов цепочки создания конечного продукта</li> <li>• Уровень повышения ресурсо- и энергоэффективности</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Уровень углеродоемкости и отходоемкости</li> <li>• Ориентация на создание высокопроизводительных рабочих мест</li> <li>• Значимость вклада в социально-экономическое развитие регионов присутствия</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Степень импортнезависимости</li> <li>• Нацеленность на реализацию НДТ</li> <li>• Степень соответствия технологий мировому уровню</li> <li>• Ориентированность компаний на постоянную технологическую модернизацию</li> </ul>

Рис. 5. Система показателей оценки потенциала предприятия в целях его включения в промышленный симбиоз (составлено авторами)

В табл. 1 представлена система показателей симбиотического потенциала, которые могут оцениваться как количественно, так и качественно через экспертную оценку.

Таблица 1

## Показатели оценки симбиотического потенциала компаний

Вид потенциала	Показатели	Оценка состояния/ динамики	
		Фактически	Качественно
Экономический	Оценка экономической устойчивости	+	+
	Оценка устойчивости прибыли	+	+
	Динамика активов и обязательств	+	+
Циркулярный	Степень вовлечения вторичных ресурсов	–	+
	Доступность ресурсов для реализации этапов цепочки создания конечного продукта	–	+
	Уровень повышения ресурсо- и энергоэффективности	+	+
Социально-экологический	Уровень углеродоемкости и отходоемкости	+	+
	Ориентация на создание высокопроизводительных рабочих мест	–	+
	Значимость вклада в социально-экономическое развитие регионов присутствия	+	+
Инновационно-технологический	Степень импортнезависимости		
	Степень соответствия технологий мировому уровню	+	+
	Нацеленность на реализацию НДТ	+	+
	Ориентированность компаний на постоянную технологическую модернизацию	+	+

1.1. **Экономический потенциал** включает оценку предприятий по финансовым показателям в динамике за последние 5–10 лет. Данный показатель является одним из определяющих критериев, так как при данном масштабе коммерческая заинтересованность является ключевой составляющей для участников. Оценка экономического потенциала предлагается осуществлять через интеграцию следующих показателей:

1.1.1. *Уровень экономической устойчивости* отражает долгосрочную платежеспособность и рентабельность предприятия. Определяется по динамике показателей финансовой независимости, эффективности инвестиций, показателей рентабельности, ликвидности или выручки.

1.1.2. *Устойчивость прибыли* определяется через соотношение финансовых обязательств промышленных предприятий к активам или к прибыли от продаж.

1.1.3. *Уровень финансовой устойчивости* определяется соотношением чистых активов предприятий и обязательств в динамике за последние 5 и более лет.

1.2. **Циркулярный потенциал** характеризует нацеленность на эффективное использование отходов или снижения объемов их образования, привлечение вторичных ресурсов, снижение потребления энергии. Определяется по реализуемым или успешно реализованным проектам, по динамике потребления ресурсов за последние 5–10 лет. Оценку предлагается осуществлять по следующим направлениям:

1.2.1. *Степень вовлечения вторичных ресурсов.* Отражает постоянную модернизацию производственных процессов и технологий для комплексного использования ресурсов и эффектов от технологических процессов. Идентифицируется через наращивание повторного использования ресурсов, упаковки, тары или заключение контрактов по реализации отходов для их использования в качестве исходного сырья у других предприятий.

1.2.2. *Доступность ресурсов* для реализации этапов цепочки создания конечного продукта определяется по возможности получения ресурсов и сроку их исчерпаемости.

1.2.3. *Уровень повышения ресурсо- и энергоэффективности* определяется за последние 5–10 лет по осуществлению постоянного улучшения показателей: ресурсопотребление, энергопотребление, использование альтернативных источников энергии, вовлечение излишней энергии одного производственного процесса в другой.

1.3. **Социально-экологический потенциал** отражает нацеленность предприятий на модернизацию производств с учетом снижения воздействия на окружающую среду для сохранения функционирования природных систем. Рассматривается опыт и увеличение заинтересованности компании в реализации эколого-социальных проектов. Социально-экологический потенциал предлагается оценивать через стремление предприятий к устойчивому развитию путем создания и выполнения программ по повышению экологической и социальной ответственности бизнеса. Оценка данного потенциала определяется через интеграцию следующих показателей:

1.3.1. *Уровень углеродоемкости, отходоемкости.* В зависимости от отрасли, к которой принадлежит симбиоз, от характера оцениваемого процесса показатели, характеризующие воздействие на экологию, могут изменяться. Оценка проводится по изменениям показателей в динамике за 5–10 лет. Перечень показателей может включать: потребление воды, образование твердых и жидких отходов, выбросы углерода или других веществ в атмосферу. Может оцениваться по фактическим значениям или через экспертную оценку.

1.3.2. *Ориентация на постоянное создание высокопроизводительных рабочих мест* может быть оценена по реализуемым программам обучения (тренинги, курсы по повышению квалификации, получение высшего образования) или через анализ кадрового состава предприятия.

1.3.3. *Значимость вклада в социально-экономическое развитие регионов* присутствия может быть определена через динамику повышения занятости населения, через реализацию социальных программ, через динамику повышения уровня заработной платы, через повышение уровня охраны и безопасности труда, через внедрение климатосберегающих технологий, через повышение качества жизни населения и развитие инфраструктуры.

1.4. **Инновационно-технологический потенциал** отражает нацеленность предприятия совершенствовать основные фонды, технологии и технологические процессы. Данный потенциал включает совокупность имеющихся

средств производства и потенциальных возможностей по внедрению новых технологий, техники и оборудования с целью поддержания текущей деятельности предприятий и увеличения ее эффективности. Рассматривается модернизация производства за последние 5–10 лет и уровень независимости предприятий. Оценку инновационно-технологического потенциала предлагается осуществлять через систему следующих показателей:

1.4.1. *Степень импортонезависимости*, которая отражает самостоятельное использование национальных ресурсов и благ: средства труда, программное обеспечение, технологии, материалы и оборудование. Определяется только экспертно.

1.4.2. *Степень соответствия технологий мировому уровню* может определяться посредством сравнения по показателям: производительность труда, экономическая, социальная и экологическая эффективность, возможность реализации технологии и ее глобальная конкурентоспособность. Оценивается только экспертно в связи с быстрой изменчивостью показателя оценки и отсутствием надежных количественных показателей оценки.

1.4.3. *Соответствие критериям НДТ*. Данный показатель отражает постоянную модернизацию производств, производственных процессов или площадок, направленную на комплексное предотвращение и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Учитывается соблюдение предприятием стандартов, изложенных в ИТС по НДТ. Показатель определяется экспертно, и наибольший балл проставляется при постоянном развитии предприятия по критериям НДТ, а не при разовых модернизациях для соблюдения ужесточаемых нормативов.

1.4.4. *Ориентация компаний на постоянную технологическую модернизацию* определяется через динамику ежегодных инвестиций. Необходимо учитывать долю собственных, сторонних и государственных источников финансирования.

Для определения стремления участников к сотрудничеству с позиции формирования симбиотических связей предлагается следующая система показателей:

2.1. *Уровень квалификации и кадровый потенциал* персонала может быть определен при оценке: кадрового состава (структуры, образования, стажа работы, квалификации, текучести), наличия и динамики программ повышения квалификации, динамики производительности персонала.

2.2. *Степень активности в партнерском взаимодействии* определяется через динамику количества совместных договоров и проектов о сотрудничестве между предприятиями, динамику количества совместных исследований, факты проведения добровольной технологической разведки.

2.3. *Активность предприятий в продвижении передовых производственных технологий* (в том числе участие в международных и всероссийских мероприятиях, форумах, конкурсах). Показатель оценивает нацеленность на внедрение и распространение технологий, позволяющих снизить энергоемкость, материалоемкость производства и/или получить материалы нового типа.

2.4. *Уровень положительной репутации и доверия стейкхолдеров* к предприятию определяется через оценку имиджа, гудвилла и надежности предприятия на момент оценки.

В табл. 2 представлена система показателей оценки стремления участников к сотрудничеству.

Таблица 2

Система показателей оценки стремления участников к сотрудничеству

Вид потенциала	Показатели оценки	Оценка состояния/ динамики	
		Фактически	Качественно
Стремление участников к сотрудничеству	Уровень квалификации и кадровый потенциал персонала	–	+
	Степень активности в партнерском взаимодействии (динамика количества договоров о сотрудничестве)	+	+
	Активность предприятий в продвижении передовых производственных технологий и связанных с ними бизнес-моделей (в том числе участие в международных и всероссийских мероприятиях, форумах, конкурсах)	+	+
	Уровень репутации	–	+

Представленные показатели в табл. 1 и 2 могут быть оценены как количественно, так и качественно путем экспертного оценивания. Экспертная оценка проводится среди стейкхолдеров симбиоза и высшего менеджмента компаний.

Эксперты присваивают удельный вес всем показателям, которые отражают их уровень значимости в проводимой оценке. Для качественных показателей определяют баллы по представленным предприятиям, где 0 соответствует низкому уровню показателя, а 100 соответствует высшей оценке показателя.

Шкала для экспертного оценивания симбиотических показателей приведена в табл. 3.

Таблица 3

Шкала для экспертного оценивания симбиотических показателей

Оценка показателя	Описание показателя	Балльная шкала
Отличный уровень	Высший уровень, по данному показателю наблюдается полное соответствие	81–100
Хороший уровень	Данный показатель соответствует предприятию, однако есть необходимость совершенствования	61–80
Удовлетворительный уровень	Данный показатель может быть рассмотрен	36–60
Условно удовлетворительный уровень	Данный показатель реализуем с малой вероятностью	16–35
Неудовлетворительный уровень	Низший уровень, по данному показателю отсутствуют возможности или перспективы	0–15

По результатам расчетов интегральных показателей формируется матрица коллаборативной зрелости, где по горизонтали откладываются интегральные показатели по результатам оценки стремления предприятий к сотрудничеству, а по вертикали – симбиотический потенциал предприятий.

Квадранты матрицы заполняются в соответствии с табл. 4.

Таблица 4

Матрица коллаборативной зрелости

Уровень коллаборативности	Степень сотрудничества	
	Низкое стремление к сотрудничеству	Высокое стремление к сотрудничеству
Высокий коллаборативный уровень	I. Низкий уровень заинтересованности 0 <...> 50	II. Высшая степень готовности 51 <...> 100
Низкий коллаборативный уровень	III. Низшая степень готовности 0 <...> 50	IV. Низкий уровень развития 51 <...> 100

Положение участников правее и выше соответствует высшей степени готовности (II квадрант). Наименьшая готовность отражает положение оцениваемой компании в квадранте III. I квадрант характеризует высокий коллаборативный уровень и низкую готовность к сотрудничеству, а IV – высокую готовность, но низкий уровень развития для создания симбиоза.

Алгоритм описанного выше подхода может быть представлен следующим образом:

1. Определение участников исследования.
2. Отбор показателей по обозначенной иерархии. Осуществляется определение качественных и количественных показателей (определяется в зависимости от доступности информации по участникам исследования).
3. Расчет количественных показателей (при наличии). Определение шкалы для осуществления экспертной оценки.
4. Создание экспертных групп, назначение весовых коэффициентов всем показателям, оценка экспертами предприятий по качественным показателям.
5. Сбор данных и обработка результатов опроса.
6. Расчет интегральных показателей с учетом весовых коэффициентов и составление матрицы возможностей сотрудничества.

Ограничения и допущения предлагаемого методического подхода состоят в следующем:

1. Отбираемые показатели для оценки должны быть применимы ко всем рассматриваемым потенциальным участникам симбиоза (определяться могут по количественным характеристикам расчетным способом или по качественным через экспертную оценку).
2. Для каждого потенциала необходимо выбрать минимум один показатель, который может быть определен для каждого участника симбиоза.
3. Оценки для фактических показателей могут определяться количественным путем по предложенной шкале, где оценивается динамика показателя и назначаются баллы. Для качественных показателей предлагается шкала с описанием присвоения баллов.
4. Экспертную оценку рекомендуется проводить среди 20 и более экспертов. Перед проведением опроса экспертами совместно назначаются весовые

коэффициенты для показателей. Назначение весовых коэффициентов может проводиться инициаторами исследования.

5. Для двух вариантов назначение весовых коэффициентов необходимо выполнять по требованию: веса должны систематизировать показатели по уровню приоритетности (значимости, влиятельности) для проведения оценки отобранных предприятий. Наибольший вес соответствует большему уровню значимости. Сумма всех весовых коэффициентов по направлению оценки должна равняться 1.

Безусловно, предлагаемая система показателей и шкала оценок варьируема, зависит от отраслевой специфики и может корректироваться экспертным сообществом.

Предложенный подход к оценке предприятий позволит не только выявить возможных участников потенциального симбиоза, но и даст возможность остальным предприятиям определить те направления, которые им необходимо развивать, чтобы в дальнейшем встраиваться в успешно функционирующие симбиозы.

### ***Кейс. Оценка коллаборативной зрелости участников промышленного симбиоза по переработке фосфогипса***

#### *Анализ ситуации с образованием гипсосодержащих отходов*

Редкоземельные элементы (редкоземельные металлы – РЗЭ) являются стратегическим сырьем для современного рынка инновационных технологий. Данные элементы используются в радиоэлектронике, машиностроении, атомной, химической и авиационной промышленности. Применяется при производстве нефти, магнитов, полупроводников, сверхпроводников, компонентов электроники, высококачественной оптики, стекла, генераторов, в качестве присадок, катализаторов и пр.

Спрос на РЗЭ на мировом рынке увеличивается. Часть элементов, таких как лантан, церий и другие легкие РЗЭ характеризуется избытком, однако иттербий, лютеций, иттрий, диспрозий, гадолиний, самарий, европий, тербий и пр. дефицитны. Основные запасы в размере 77 % сосредоточены в странах БРИКС, однако основными поставщиками являются только Китай (60 %), США (16 %), Бирма (8 %) и Австралия (7,5 %). В России производство РЗЭ осуществляется только на Ловозерском лопаритовом месторождении в Мурманской области и направляется на экспорт. Собственные потребности перекрывает импорт. Учитывая геополитическую обстановку и увеличение спроса на РЗЭ, для России становятся стратегически важным сырьем РЗЭ. Производство данных элементов влияет на развитие новых отраслей экономики.

Возможности собственного производства РЗЭ определяются наличием широкой ресурсной базы в Мурманской области, Якутии, Чукотке, Иркутске и Забайкальском крае. Большая часть запасов сосредоточена в Ловозерском месторождении (Мурманская обл.), однако сейчас данные руды не извлекают из сырья, а как отход направляют в отвалы хвостохранилищ в виде фосфогипса. В остальных месторождениях добыча не ведется.

К 2022 г. отмечено, что ежегодные накопления фосфогипса в мире достигли 150–200 млн т. На Россию в образовании фосфогипса приходится около 15 млн т/г. В Воскресенске, Волхове, Уварово, Мелеузе, Череповце, Балаково и т.д. в отвалах крупных предприятий России уже накоплено более 200 млн т фосфогипса. По некоторым источникам объемы фосфогипса составляют 450–500 млн т.

Гипсосодержащие отходы в несколько раз превышают объемы добычи гипсового сырья и сопутствующих полезных компонентов. При получении фосфорной кислоты и удобрений отмечено наибольшее образование отхода (на 1 т полезного сырья тратится 4–7 т фосфогипса), а вовлечение отходов во вторичное производство составляет 1 % или 150 тыс. т. Таким образом, фосфогипс – это побочный продукт при производстве минеральных удобрений (фосфорной кислоты) из апатита и фосфорита. Так как состав фосфогипса включает также используемый в строительстве гипс, часть отходов перерабатывается и используется в строительной индустрии, однако оставшаяся большая часть фосфогипса с РЗЭ направляется в отвалы.

Стремительное образование отвалов из фосфогипса является техногенной нагрузкой на окружающую среду. Фосфогипс имеет пылевидную форму и включает в состав вещества, которые под действием ветра или движения грунтовых вод распространяются по окружающим территориям. Опасные компоненты в виде фтора, фосфора, радиоактивных и других примесей попадают в почву, атмосферу, поверхностные и подземные воды, что необходимо учитывать при предотвращении НВОС.

Особенностью переработки фосфогипса является то, что в зависимости от вида исходного сырья и используемой технологии предприятия меняется степень извлечения полезных компонентов, степень добычи сопутствующих веществ, что снижает объемы образования фосфогипса как отхода.

Предотвращение данного воздействия возможно через переработку фосфогипса путем создания кусковидных форм данного отхода или через вовлечение отходов во вторичное производство.

Таким образом, актуальным является вопрос объединения участников рынка для создания коллаборативных связей с целью комплексного использования данного сырья. Решение данной задачи требует внедрения перспективных конкурентоспособных технологий, повышения экономического эффекта и предотвращения НВОС. Для решения перечисленных задач необходимо создание производств не на основе традиционной линейной модели, а через формирование циклических моделей производств, когда отходы одного производства являются сырьем другого, что повышает экономическую целесообразность создания замкнутых цепочек производства через повышение ресурсного потенциала и снижения НВОС.

Для рассматриваемого проекта это может быть осуществлено через использование отходов (фосфогипса) от переработки апатита и фосфорита. Фосфогипс может быть использован для производства возможных полезных продуктов в виде строительных материалов и редкоземельных элементов.

#### *Технология комплексной переработки фосфогипса*

Положительный опыт по разработке технологий комплексной переработки фосфогипса продемонстрировала группа компаний «Скайград» на примере пилотного проекта. В 2011–2017 гг. были проведены исследования, в результате которых при переработке фосфогипса удалось получить сырье для производства сухих строительных смесей, плит и гипсокартона, а также выделить концентраты редкоземельных элементов. По результатам исследований были получены две технологии комплексной переработки исходного сырья в виде фосфогипса. На рис. 6 приведена одна из технологических схем.



Рис. 6. Схема комплексной переработки фосфогипса (по данным группы компаний «Скайград», URL: <http://rzm.sky-grad.ru/fosfogips>)

По данной технологии использование отхода в виде фосфогипса (в качестве сырья для производства РЗЭ) позволит повысить ресурсную эффективность за счет комплексной переработки сырья и снижения объемов образующихся отходов. Описанные технологии были апробированы в рамках пилотного проекта ООО «Лаборатория инновационных технологий» (ООО «ЛИТ»).

ГК «Скайград» осуществляет переработку фосфогипса в г. Воскресенске на территории АО «Воскресенские минеральные удобрения» в рамках пилотного проекта. По полученным результатам данный проект показал положительный эффект и может быть внедрен в аналогичные производства.

Технологии переработки РЗЭ характеризует один из примеров повышения ресурсной эффективности и комплексной переработки сырья.

Схема потоков ресурсов для формирования симбиотических связей приведена на рис. 7.



Рис. 7. Процесс комплексной переработки по схеме «Апатит, фосфорит – фосфогипс – РЗЭ, строительные материалы» (составлено авторами)

На рис. 7 показан участок технологического процесса, где целесообразно формирование симбиоза. На данном этапе отходы просто складывают в отвалы. Формирование же симбиоза позволит обеспечить переработку отходов в виде фосфогипса другими предприятиями, что значительно снизит нагрузку на окружающую среду.

В качестве основного участника потенциального симбиоза выбрана одна из ведущих компаний по производству фосфорных удобрений с образованием отходов в виде фосфогипса – АО «ФосАгро». В состав АО «ФосАгро» входят три перерабатывающих предприятия (АО «Апатит» (Вологодская область), Балаковский филиал АО «Апатит», Волховский филиал АО «Апатит»), расположенных в центральном и Северо-Западном регионах России. Данные предприятия являются активными производителями отходов в виде фосфогипса, что объясняет совпадение их расположений рядом с отвалами.

Учитывая приведенную статистику образования фосфогипса (на 1 т формируется 5–7 т фосфогипса), АО «ФосАгро» сгенерировало за 2022 г. в среднем 21,920 млн т фосфогипса. Сейчас предприятие частично осуществляет реализацию отходов. Фосфогипс направляется на нужды сельского хозяйства, однако большая часть складывается в отвалы. В 2021 г. АО «ФосАгро» было поставлено 3,54 млн т фосфогипса для нужд сельского хозяйства.

Другими участниками симбиоза были выбраны потенциальные потребители фосфогипса. Предприятия определялись по принципам:

- принадлежность к металлургической промышленности;
- возможность совмещения основной деятельности и встраивания в технологическую цепочку отхода в виде фосфогипса как исходного сырья для производства РЗЭ;
- транспортная доступность и развитая логистическая инфраструктура.

ОАО «Атомредметзолото» – российская уранодобывающая компания, которая является горнорудным дивизионом Государственной корпорации «Росатом». Занимает шестое место в мире по объему добычи урана и второе по объему запасов урана в недрах. В 2021 г. компанией было добыто 2635 т.

Помимо основной деятельности ОАО «Атомредметзолото» занимается развитием других направлений бизнеса: с 2021 г. производит один из РЗЭ – скандий; перерабатывает ильменит-цирконовые пески; осуществляет опытно-промышленную добычу золота на месторождении Северное. В годовой отчетности компании отражена заинтересованность в решении социально-экономических вопросов, что делает рассматриваемый нами проект приоритетным. Из РЗЭ сейчас добывается лишь два, однако предлагаемая технология позволяет выделять все 17 возможных.

ОАО «Атомредметзолото» сейчас в рамках проекта «Сырьевое обеспечение стратегических инициатив» поставило цель по удовлетворению отечественных потребностей в РЗЭ. К 2021 г. построено первое в стране производство титана. Далее планируется осуществлять развитие направления по добыче РЗЭ, поэтому рассматриваемая нами технология соответствует приоритетам развития. Сейчас у компании уже реализуются восемь самостоятельных проектов социально-экологического направления, что подтверждает опыт и заинтересованность в решении проблем долгосрочного устойчивого развития.

Другой участник симбиоза, который также может быть заинтересован в развитии производства РЗЭ, – ОАО «Чепецкий механический завод»

(ОАО «ЧМЗ»). Специализируется на производстве металлов, сплавов и изделий из них для атомной промышленности (является производителем металлического циркония, ниобия, кальция). На базе завода сейчас осуществляется по своей технологии добыча одного элемента из всех РЗЭ. Намерение дальше развивать данное направление подтверждается пятью реализуемыми проектами, которые связаны с добычей и использованием редких элементов. Необходимость производства РЗЭ для данной корпорации подтверждается потребностью в РЗЭ при производстве полупроводниковой техники, что является стратегически важным.

Заинтересованность завода в решении экологических проблем отражает стратегия компании. С 2019 г. запущена установка по переработке отходов производства (позволяет на 70 % сократить объем накопленного в хвостохранилищах отхода от производства урана). Опыт ОАО «ЧМЗ»: семь проектов.

Стоит рассмотреть потенциальным участником симбиоза АО «Туганский ГОК "Ильменит"». На данном объекте ведется добыча и обогащение ильменит-цирконовых песков. Финансовые показатели компании (прибыль и выручка) демонстрируют снижение с 2016 г. В 2021 г. отмечен убыток в 16,82 млн руб., однако АО «ТГОК "Ильменит"» заинтересовано в собственном производстве РЗЭ. В рамках дорожной карты Российской Федерации «Технологии новых материалов и веществ» планируется, что Туганский ГОК «Ильменит» будет первым полномасштабным производством по направлению редких и редкоземельных металлов. Мощность по переработке позволит обеспечить стабильность, безопасность и бесперебойность поставок стратегически важных концентратов – циркониевых, титановых и рутил-лейкоксоновых для нужд Госкорпорации «Росатом» и других крупных российских предприятий. Опыт компании АО «ТГОК "Ильменит"» представлен четырьмя проектами (развитие стекольного производства и один по развитию РЗЭ).

Другой потенциальный участник симбиоза – ОАО «Соликамский магниевый завод», который уже осуществляет производство РЗЭ и имеет свои технологии. Сейчас ОАО «Соликамский магниевый завод» занимается производством ниобия, магния, губчатого титана и тантала. В 2020 г. завод был единственным в стране производителем редкоземельных элементов. Сейчас стратегия завода нацелена на реализацию проектов в сфере импортозамещения, на создание технологического цикла по производству не только сырья, но и конечной продукции с использованием редких металлов и редкоземельных элементов. Финансовые показатели компании на 2021 г. демонстрируют увеличение, а стратегия развития содержит задачи создания производств РЗЭ, что подтверждает интерес к созданию предлагаемого симбиоза. Опыт ОАО «Соликамский магниевый завод» насчитывает восемь проектов.

#### *Оценка симбиотического потенциала и коллаборативной зрелости*

По предложенной в разделе 3 статьи методологии была проведена оценка возможности симбиоза между АО «ФосАгро» как основного участника симбиоза и другими предприятиями – потенциальными потребителями отхода АО «ФосАгро» в виде фосфогипса. Результаты оценки приведены в табл. 5 и 6. Экспертная группа в количестве 19 человек определила ранги показателей по их значимости с позиции важности для формирования симбиоза. Экспертная группа провела оценку показателей по каждому предприятию.

Таблица 5

Сравнительная характеристика предприятий по определению симбиотического потенциала  
(составлено авторами на основе экспертной оценки)

Симбиотический потенциал	Характеристика показателя	Удельный вес	АО «Фос-Агро»	ОАО «Атомредметзолото»	АО «ЧМЗ»		АО «Туганский ГОК "Ильменит"»		ОАО «Соликамский магниевый завод»			
					83	8,30	31	3,10	74	7,40		
Экономический	1.1.1 Оценка экономической устойчивости	0,10	96	9,60	77	7,70	83	8,30	31	3,10		
	1.1.2 Оценка устойчивости прибыли	0,10	90	9,00	64	6,40	58	5,80	14	1,40		
	1.1.3 Динамика активов и обязательств	0,05	88	4,40	68	3,40	64	3,20	42	2,10		
Циркулярный	1.2.1 Степень вовлечения вторичных ресурсов	0,05	81	4,05	95	4,75	90	4,50	59	2,95		
	1.2.2 Доступность ресурсов для реализации этапов цепочки создания конечного продукта	0,10	92	9,20	91	9,10	78	7,80	72	7,20		
	1.2.3 Уровень повышения ресурсо- и энергоэффективности	0,11	96	10,56	92	10,12	91	10,01	74	8,14		
Социально-экологический	1.3.1 Уровень углеродоемкости и отходоемкости	0,07	92	6,44	82	5,74	74	5,18	51	3,57		
	1.3.2 Ориентация на создание высокопроизводительных рабочих мест	0,06	90	5,40	80	4,80	79	4,74	59	3,54		
	1.3.3 Значимость вклада в социально-экономическое развитие регионов присутствия	0,05	92	4,60	87	4,35	89	4,45	65	3,25		
Инновационно-технологический	1.4.1 Степень импортонезависимости	0,08	88	7,04	74	5,92	56	4,48	64	5,12		
	1.4.2 Степень соответствия технологий мировому уровню	0,06	96	5,76	84	5,04	66	3,96	71	4,26		
	1.4.3 Нацеленность на реализацию НДТ	0,10	97	9,70	84	8,40	77	7,70	73	7,30		
	1.4.4 Ориентированность компаний на постоянную технологическую модернизацию	0,07	92	6,44	76	5,32	64	4,48	52	3,64		
Итого:		1,00	–	92,19	–	79,99	–	74,60	–	55,57	–	81,72

Таблица 6

Результаты оценки по направлению «стремление участников к сотрудничеству»  
(составлено авторами на основе экспертной оценки)

Направление оценки	Характеристика показателя	Удельный вес	АО «ФосАгро»		ОАО «Атомред-метзолото»		АО «ЧМЗ»		АО «Гутанский ГОК "Ильменит"»		ОАО «Соликамский магниевый завод»	
Стремление участников к сотрудничеству	2.1 Уровень квалификации и кадровый потенциал персонала	0,30	92	27,60	84	25,20	77	23,10	68	20,40	67	20,00
	2.2 Степень активности в партнерском взаимодействии (динамика договоров о сотрудничестве)	0,20	86	17,20	72	14,40	66	13,20	53	10,60	61	12,20
	2.3 Активность предприятий в продвижении передовых производственных технологий (в том числе участие в международных и всероссийских мероприятиях, форумах, конкурсах)	0,25	92	23,00	82	20,50	63	15,75	44	11,00	51	12,75
2.4 Уровень репутации		0,25	90	22,50	84	21,00	83	20,75	57	14,25	68	17,00
<b>Итого:</b>		<b>1,00</b>	<b>—</b>	<b>90,30</b>	<b>—</b>	<b>81,10</b>	<b>—</b>	<b>72,80</b>	<b>—</b>	<b>56,25</b>	<b>—</b>	<b>60,05</b>

По полученным в таблицах результатам строим матрицу для определения возможности создания симбиоза между АО «ФосАгро» и потенциальными партнерами (рис. 8), где по горизонтальной оси представлено стремление участников к сотрудничеству, а по вертикальной оси – симбиотический потенциал.

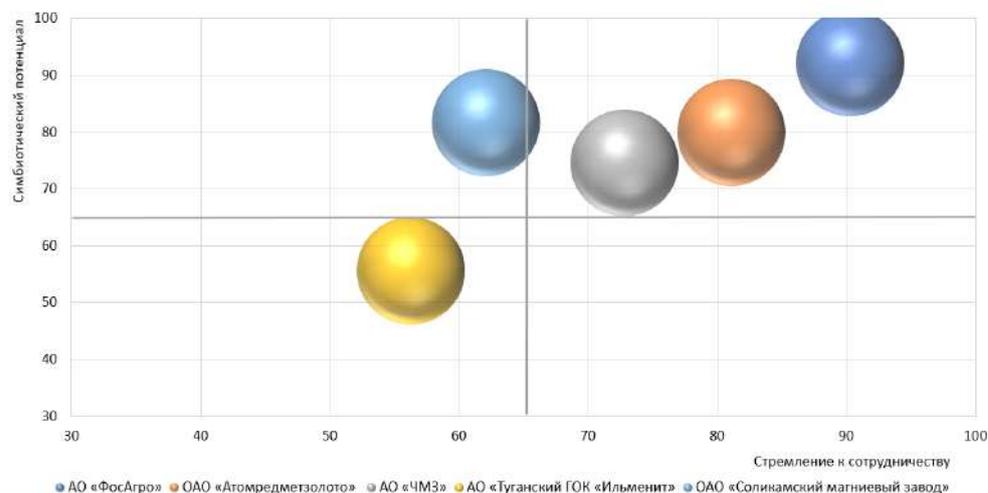


Рис. 8. Матрица возможности создания промышленных симбиозов (составлено авторами)

Критерием для определения возможности создания симбиоза является положение участника:

- в квадранте, расположенном правее и выше;
- близость потенциального участника к АО «ФосАгро».

На рис. 8 такому критерию соответствуют предприятие ОАО «Атомредметзолото», что позволяет делать вывод о его высокой степени готовности к созданию совместного симбиоза.

Следующим претендентом на создание симбиоза может быть ОАО «Соликамский магниевый завод», однако предприятие имеет низкое стремление к сотрудничеству, хоть и превышает по показателям симбиотический потенциал ОАО «Атомредметзолото». Данное предприятие может рассматриваться как симбиотический актер только при формировании стратегической политики компании, нацеленной на партнерство и сотрудничество.

Для предприятия АО «Туганский ГОК "Ильменит"» характерна низкая степень готовности к созданию симбиоза. Для его возможного когда-либо рассмотрения в качестве актора симбиоза менеджменту компании необходимо серьезно работать над развитием симбиотического потенциала и культурой партнерства.

#### ***Кейс. Оценка коллаборативной зрелости акторов промышленной инновационной экосистемы «Безопасные фосфаты»***

Под промышленной экосистемой авторы понимают сеть промышленных симбиозов, включающую в себя акторов, которые производят промышленные

товары и услуги в симбиотическом сотрудничестве, рационально используя ресурсы и особую интеллектуальную среду, формируемую посредством связей между акторами. Объединение акторов происходит на условиях сетевого партнерства и когнитивности как основного механизма достижения стратегических целей.

По результатам оценки симбиотического потенциала и коллаборативной зрелости были сформированы четыре промышленных симбиоза – потенциальные акторы промышленной инновационной экосистемы «Безопасные фосфаты» при условии достижения определенного уровня коллаборативной зрелости. Авторы подробно описали возможный состав акторов промышленных инновационных экосистем и их роли в предыдущих работах [17, 26–28]. В промышленной инновационной экосистеме «Безопасные фосфаты» интегратором является компания «Скайград», которая обеспечивает трансфер технологии комплексной переработки фосфогипса. Основные акторы, обеспечивающие трансфер знаний и инноваций, представлены следующими организациями:

1. Центр инжиниринга и промышленного дизайна Саратовского государственного университета.
2. Центр экологической промышленной политики.
3. Инжиниринговые центры.

Перечень промышленных акторов, которые являются производителями РЗЭ и потребителями отходов в виде фосфогипса, представлены в табл. 7. Каждый промышленный симбиоз сформирован в отдельном регионе с учетом уровня логистического и инфраструктурного развития территорий.

Таблица 7

Основные акторы промышленной инновационной экосистемы  
«Безопасные фосфаты»

Акторы ПЭ	Роль акторов в экосистеме	Регион присутствия
1	2	3
<i>Промышленный симбиоз 1</i>		
АО «Атомредметзолото»	Производитель РЗЭ	Архангельская область
Инжиниринговый центр «ВНИИПромтехнологии»	Разработчик технологии по производству РЗЭ	Московская область
Евроцемент групп	Потребитель – использование фосфогипса при производстве цемента	Архангельская область
ОАО «Котласский химический завод»	Потребитель – использование фосфогипса при производстве лакокрасочных изделий	Архангельская область
<i>Промышленный симбиоз 2</i>		
ЕвроХим-УКК	Производитель РЗЭ	Уральский регион
ОАО «Чепецкий механический завод»	Производитель РЗЭ	Уральский регион
АО «Свердловский завод гипсовых изделий»	Производитель гипсокартона	Уральский регион

Окончание табл. 7

1	2	3
ООО «Урал-Гипс»	Производитель пазогребных плит	Уральский регион
ООО «Строительные материалы и технологии»	Использует фосфогипс для производства строительных смесей	Уральский регион
Компания «ГИПСОПОЛИМЕР»	Производитель материалов для «сухого» строительства и высококачественной отделки	Уральский регион
<i>Промышленный симбиоз 3</i>		
АО «ФосАгро»	Производитель отходов в форме фосфогипса	Саратовская область
Центр инжиниринга и промышленного дизайна Саратовского государственного университета	Разработчик технологии по производству фосфогипса дорожного, используемого при строительстве дорог	Саратов
Нижне-Волжское Управление Федеральных автомобильных дорог Федерального дорожного агентства	Использует фосфогипс для при строительстве и ремонте дорог	Саратовская область
Саратовское дорожно-строительное предприятие	Использует фосфогипс для при строительстве и ремонте дорог	Саратов
<i>Промышленный симбиоз 4</i>		
АО «Воскресенские минеральные удобрения»	Производитель отходов в форме фосфогипса	Московская область
Производственная компания «ОТЭКС»	Использует фосфогипс для производства строительных смесей	Москва
Компания «БОЛАРС»	Производитель отделочных материалов	Московская область
Завод «ГЛИМС-Продакшн»	Производитель гипсокартона	Московская область
Завод «Perfekta»	Использует фосфогипс для производства строительных смесей	Москва
Компания «Русеан»	Производитель пазогребных плит	Московская область

Единицей анализа и оценки коллаборативной зрелости являются акторы – промышленные симбиозы (ПС). Предлагаемая сбалансированная система показателей (табл. 8) содержит достаточно большое количество критериев, значимость которых неравнозначна для различных акторов экосистемы. В связи с этим при оценке потенциальных участников промышленной инновационной экосистемы для каждого актора были определены весовые коэффициенты критериев, которые в дальнейшем позволили получить интегральные оценки.

Таблица 8

Сбалансированная система показателей для оценки коллаборативной зрелости акторов промышленной инновационной экосистемы

Коллаборативная зрелость	Характеристика показателей	Удельный вес	ПС 1	ПС 2	ПС 3	ПС 4
Инновационная зрелость	Уровень инфраструктурного развития	0,22	16,14	17,80	18,02	19,90
	Кибербезопасность	0,19	14,20	15,39	16,34	15,96
	Ресурсная обеспеченность	0,20	17,60	19,80	17,20	19,00
	Сбалансированность обмена знаниями и ресурсами между акторами	0,21	15,59	17,22	18,27	18,90
	Качество цифровой платформы для взаимодействия	0,18	12,50	13,14	12,96	14,04
Итого:		1,00	76,03	83,35	82,79	87,80
Экосистемное взаимодействие	Деловая репутация	0,17	14,64	16,98	16,15	16,21
	Симбиотические связи	0,18	11,04	13,12	12,40	13,22
	Скорость реагирования на изменение запросов партнеров	0,15	12,15	13,40	11,70	13,75
	Уровень интеграции знаний, технологий, ресурсов	0,16	10,24	12,84	11,72	13,20
	Уровень самоорганизации	0,19	10,21	12,97	11,40	11,30
	Степень удовлетворенности качеством среды	0,15	11,55	13,15	12,25	11,45
	Итого:		1,00	69,83	82,46	75,62

Оценка коллаборативной зрелости промышленных акторов проводилась на основе методического подхода, изложенного в разделе 3, экспертной группой, в состав которой вошли представители бизнес-сообщества, науки и региональных органов власти. Результаты оценки приведены в табл. 8.

По полученным в таблице результатам строим матрицу для определения промышленных акторов экосистемы «Безопасные фосфаты» (рис. 9), где по горизонтальной оси представлен уровень экосистемного взаимодействия потенциальных акторов, а по вертикальной оси – инновационная зрелость.

Критериями для определения промышленных акторов экосистемы являются положение потенциального актора в квадранте, расположенном правее и выше, а также близость акторов друг к другу. На рис. 9 таким критериям полностью соответствуют ПС 2 и ПС 4 и частично ПС 3. Промышленный симбиоз под номером 1 не удовлетворяет данным критериям из-за низкого уровня экосистемного взаимодействия. По уровню экосистемного взаимодействия ПС 2 больше ПС 4 на 9,33 балла за счет показателей уровня самоорганизации и степени удовлетворенности качеством среды. При этом уровень инновационной

зрелости в ПС 4 превышает аналогичный показатель в ПС 2 на 4,55 балла, так как показатель уровня инфраструктурного развития значительно выше. ПС 3 по уровню инновационной зрелости соответствует требованиям, предъявляемым к промышленным акторам, но в данном симбиозе необходимо усилить симбиотические связи и уровень интеграции, что позволит повысить экосистемное взаимодействие. Таким образом, в состав экосистемы «Безопасные фосфаты» вошли промышленные симбиозы по переработке фосфогипса, расположенные в Уральском регионе, Московской и Саратовской областях.

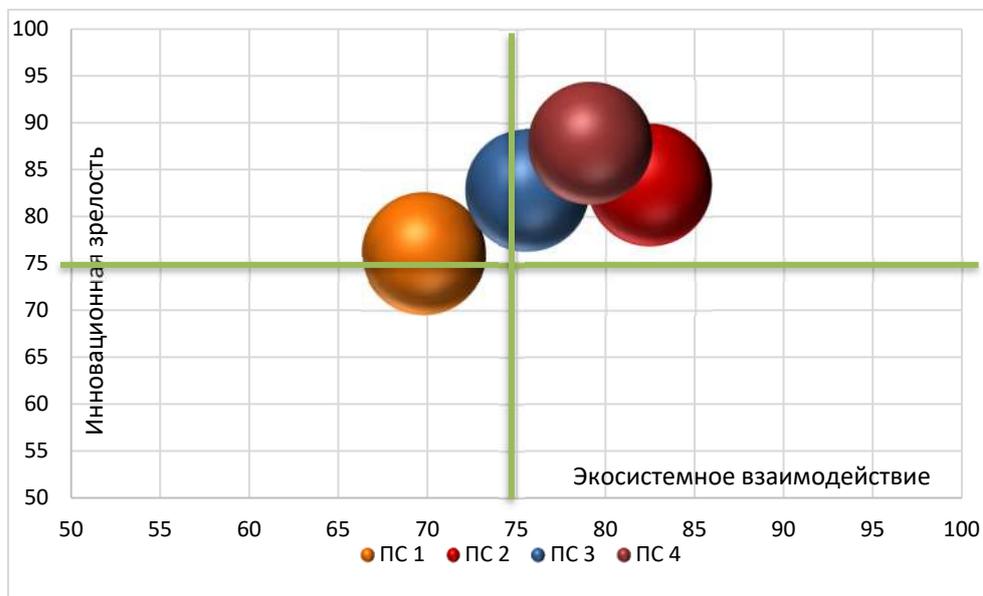


Рис. 9. Матрица формирования промышленной инновационной экосистемы «Безопасные фосфаты» (составлено авторами)

### ***Заключение и выводы***

В данной статье предпринята попытка ответа на один из сложных вопросов, связанных с критериями определения зрелости и эффективности сетевых организационно-управленческих моделей, которые очень популярны в современной теории и практике. Кластеры, симбиозы, экосистемы и т.п. – это модели, широко обсуждаемые сегодня. Причем развиваются они эволюционно, переходя от одной формы к другой, от менее совершенной к более совершенной и приспособленной к сложившейся среде функционирования хозяйствующих субъектов. Однако научная литература по-прежнему больше концентрируется на статическом подходе, описывающем ту или иную форму таких сетевых систем. Кроме того, еще меньше внимания уделяется акторам, которых можно охарактеризовать как «сложных адаптивных лидеров» [29] в формировании и развитии сложных организационно-управленческих систем и ключевым критериям, по которым можно судить о степени их развития или зрелости [30].

По нашему мнению, горизонтальная интеграция промышленных предприятий развивается эволюционно на основе повышения уровня коллаборативной зрелости каждого из акторов. Формирование промышленных экосистем требует гораздо большей глубины и масштаба анализа, особенно в контексте

ограниченных традиций сотрудничества и доверия, когда необходим постепенный переход от одной стадии развития к другой. Научные результаты, которые позволяют установить критерии, по которым можно судить о переходе от одной организационно-управленческой сетевой модели к другой, проследить их эволюцию, приобретают теоретическое и практическое значение.

Промышленная экосистема может рассматриваться как сеть различных взаимодействующих акторов, которые сотрудничают друг с другом исключительно на добровольной основе; их взаимодействие постоянно производит новый порядок, возникающий без центрального контроля [31]. Благодаря своим аттракторам – определенным ценностям, поведенческим нормам и моделям – экосистема не становится хаотичной [32].

Важно также понимать, что у промышленной экосистемы не может быть идеального состояния; можно только выявить эволюционный потенциал существующей системы и делать небольшие шаги в положительном направлении «накопления» коллаборативной зрелости [27, 33].

Акторы экосистем в целом обладают свободой действий, но при этом в экосистеме должны устанавливаться невидимые границы (например, неформальные правила, поощрение позитивных моделей поведения и препятствование негативным) [33]. Для эволюционного развития сетевых моделей необходимо, чтобы обратная связь основывалась на четких и прозрачных показателях, и это очень важно для отслеживания прогресса и обеспечения возможности обучения. Предлагаемый в настоящей статье подход позволяет это сделать.

Развитие коллаборации предприятий через увеличение количества совместных инновационных технологических и экологических проектов имеет тенденцию перерасти в промышленные экосистемы, когда знания о новых произведенных или перспективных вариантах обмена ресурсами будут передаваться не только между предприятиями одного региона, но и привлекут новых акторов с других территорий и отраслей экономики. Такое взаимодействие позволит обеспечить стратегию долгосрочного развития каждому из акторов, а коммерческие и имиджевые выгоды сделают экосистемное взаимодействие приоритетным для всех участников рынка.

### *Список литературы*

1. Porter M., Delgado M., Ketels C., Stern S. Moving to a New Global Competitiveness Index // The Global Competitiveness Report 2008–2009. World Economic Forum. Geneva, 2008. P. 43–63.
2. Mason K., Spring M. The sites and practices of business models // Industrial Marketing Management. 2011. Vol. 40. P. 1032–1041.
3. Coombes P. H., Nicholson J. D. Business models and their relationship with marketing: A systematic literature review // Industrial Marketing Management. 2013. Vol. 42. P. 656–664.
4. Miles R. E., Snow C. C. Causes of failure in network organizations // California Management Review. 1992. Vol. 34, № 4. P. 53–72.
5. Kloth C., Applegate B. Inter-Organization Collaboration & Partnerships: A Critical Analysis // OD Network Annual Conference. 2004. URL: <https://ru.scribd.com/document/156397997/Inter-organization-Collaboration-and-Partnerships-A-Critical-Analysis> (дата обращения: 28.01.2022).
6. Prokhorova V. V., Anopchenko T. U., Chernikova V. E. [et al.]. Formation and development of industrial clusters in the socioeconomic regional system // Espacios. 2018. Vol. 39.

7. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L. Evaluation of Circular and Integration Potentials of Innovation Ecosystems for Industrial Sustainability // Sustainability. 2020. Vol. 12. P. 4574. doi:10.3390/su12114574
8. Gray B. Collaborating: Finding Common Ground for Multiparty Problems. San Francisco : Jossey-Bass, 1989. 358 p.
9. Hickman G. R. Leading Organizations Perspectives for a New Era Third Edition. University of Richmond, 2015. 808 p.
10. Azevedo J., Ferreira I., Dias R. [et al.]. Industrial Symbiosis Implementation Potential – An Applied Assessment Tool for Companies // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 1420. doi:10.3390/su13031420
11. Haq H., Välisuo P., Niemi S. Modelling Sustainable Industrial Symbiosis // Energies. 2021. Vol. 14. P. 1172. doi:10.3390/en14041172
12. Castellet-Viciano L., Hernandez-Chover V., Bellver-Domingo Á., Hernandez-Sancho F. Industrial Symbiosis: A Mechanism to Guarantee the Implementation of Circular Economy Practices // Sustainability. 2022. Vol. 14 (23). P. 15872. doi:10.3390/su142315872
13. Cioca L.-I., Ciomoş A.-O., Şeitoar D. [et al.]. Industrial Symbiosis through the Use of Biosolids as Fertilizer in Romanian Agriculture // Recycling. 2021. Vol. 6. P. 59. doi:10.3390/recycling6030059
14. Haller H., Fagerholm A.-S., Carlsson P. [et al.]. Towards a Resilient and Resource-Efficient Local Food System Based on Industrial Symbiosis in Härnösand: A Swedish Case Study // Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 2197. doi:10.3390/su14042197
15. Haq H., Välisuo P., Niemi S. Modelling Sustainable Industrial Symbiosis // Energies. 2021. Vol. 14. P. 1172. doi:10.3390/en14041172
16. Chertow M. R. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy // Annual Review of Energy and the Environment. 2000. Vol. 25. P. 313–337.
17. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L. Elaboration of a Mechanism for Sustainable Enterprise Development in Innovation Ecosystems // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2020. Vol. 6 (4). P. 95. doi:10.3390/joitmc6040095
18. Tolstykh T., Gamidullaeva L., Shmeleva N. Approach to the Formation of an Innovation Portfolio in Industrial Ecosystems Based on the Life Cycle Concept // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2020. Vol. 6. P. 151. doi:10.3390/joitmc604015
19. Gamidullaeva L., Shmeleva N., Tolstykh T., Shmatko A. Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development // Sustainability. 2022. Vol. 14 (2). P. 704.
20. 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.
21. Branca T. A., Fornai B., Colla V. [et al.]. Skills Demand in Energy Intensive Industries Targeting Industrial Symbiosis and Energy Efficiency // Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 15615. doi:10.3390/su142315615
22. Skobelev D. O. Building the infrastructure for transforming Russian industry towards better resource efficiency and environmental performance // Procedia Environmental Science, Engineering and Management. 2021. Vol. 8, № 2. P. 483–493.
23. Roslyakov P. V., Cherkasskii E. V., Guseva T. V. [et al.]. Process-Related Standardization of Thermal Electric Power Facilities: The Best Available Techniques and General Binding Rules // Thermal Engineering. 2021. Vol. 68, № 10. P. 735–742. doi:10.1134/S0040601521100050
24. Kaplan R. S., Norton D. P. Using the Balanced Scorecard as a Strategic Management System // Harvard Business Review. 1996. № 1. P. 365.
25. Saaty T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process // Interfaces. 1994. Vol. 24, № 6. P. 19–43.
26. Гамидуллаева Л. А., Толстых Т. О., Шмелева Н. В. Промышленные и территориальные экосистемы в контексте устойчивого развития : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 160 с.

27. Johnson-Kanda I., Yawson R. M. Complex Adaptive Leadership for Organization and Human Development // Proceedings of the 55th Annual Eastern Academy of Management Conference (Providence, RI, USA, 2–5 May 2018). P. 1–14,19.
28. 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.
29. Толстых Т. О., Гамидуллаева Л. А., Шмелева Н. В. Методические аспекты формирования портфеля проектов в инновационной экосистеме // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 1. С. 5–23.
30. Grumadaite K., Jucevičius G. Strategic Approaches to the Development of Complex Organisational Ecosystems: The Case of Lithuanian Clusters // Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 15697. doi:10.3390/su142315697
31. Stanczyk S. Organisational ecosystem and stakeholders view. In search of epistemological logic in management // International Journal of Economics and Business Research. 2017. Vol. 14. P. 268–283.
32. Cîndea I. Complex systems-new conceptual tools for international relations // Perspectives. 2006. Vol. 14. P. 46–70.
33. 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

### *References*

1. Porter M., Delgado M., Ketels C., Stern S. Moving to a New Global Competitiveness Index. *The Global Competitiveness Report 2008–2009*. World Economic Forum. Geneva, 2008:43–63.
2. Mason K., Spring M. The sites and practices of business models. *Industrial Marketing Management*. 2011;40:1032–1041.
3. Coombes P.H., Nicholson J.D. Business models and their relationship with marketing: A systematic literature review. *Industrial Marketing Management*. 2013;42:656–664.
4. Miles R.E., Snow C.C. Causes of failure in network organizations. *California Management Review*. 1992;34(4):53–72.
5. Kloth C., Applegate B. Inter-Organization Collaboration & Partnerships: A Critical Analysis. *OD Network Annual Conference*. 2004. Available at: <https://ru.scribd.com/document/156397997/Inter-organization-Collaboration-and-Partnerships-A-Critical-Analysis> (accessed 28.01.2022).
6. Prokhorova V.V., Anopchenko T.U., Chernikova V.E. et al. Formation and development of industrial clusters in the socioeconomic regional system. *Espacios*. 2018;39.
7. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L. Evaluation of Circular and Integration Potentials of Innovation Ecosystems for Industrial Sustainability. *Sustainability*. 2020;12:4574. doi:10.3390/su12114574
8. Gray B. *Collaborating: Finding Common Ground for Multiparty Problems*. San Francisco: Jossey-Bass, 1989:358.
9. Hickman G.R. *Leading Organizations Perspectives for a New Era Third Edition*. University of Richmond, 2015:808.
10. Azevedo J., Ferreira I., Dias R. et al. Industrial Symbiosis Implementation Potential – An Applied Assessment Tool for Companies. *Sustainability*. 2021;13:1420. doi:10.3390/su13031420
11. Haq H., Välisuo P., Niemi S. Modelling Sustainable Industrial Symbiosis. *Energies*. 2021;14:1172. doi:10.3390/en14041172
12. Castellet-Viciano L., Hernandez-Chover V., Bellver-Domingo Á., Hernandez-Sancho F. Industrial Symbiosis: A Mechanism to Guarantee the Implementation of Circular Economy Practices. *Sustainability*. 2022;14(23):15872. doi:10.3390/su142315872

13. Cioca L.-I., Ciomoş A.-O., Şeitoar D. et al. Industrial Symbiosis through the Use of Biosolids as Fertilizer in Romanian Agriculture. *Recycling*. 2021;6:59. doi:10.3390/recycling6030059
14. Haller H., Fagerholm A.-S., Carlsson P. et al. Towards a Resilient and Resource-Efficient Local Food System Based on Industrial Symbiosis in Härnösand: A Swedish Case Study. *Sustainability*. 2022;14:2197. doi:10.3390/su14042197
15. Haq H., Välisuo P., Niemi S. Modelling Sustainable Industrial Symbiosis. *Energies*. 2021;14:1172. doi:10.3390/en14041172
16. Chertow M.R. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*. 2000;25:313–337.
17. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L. Elaboration of a Mechanism for Sustainable Enterprise Development in Innovation Ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2020;6(4):95. doi:10.3390/joitmc6040095
18. Tolstykh T., Gamidullaeva L., Shmeleva N. Approach to the Formation of an Innovation Portfolio in Industrial Ecosystems Based on the Life Cycle Concept. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2020;6:151. doi:10.3390/joitmc604015
19. Gamidullaeva L., Shmeleva N., Tolstykh T., Shmatko A. Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development. *Sustainability*. 2022;14(2):704.
20. Gamidullaeva L., Tolstykh T., Bystrov A. et al. Cross-sectoral digital platform as a tool for innovation ecosystem development. *Sustainability*. 2021;13:11686.
21. Branca T.A., Fornai B., Colla V. et al. Skills Demand in Energy Intensive Industries Targeting Industrial Symbiosis and Energy Efficiency. *Sustainability*. 2022;14:15615. doi:10.3390/su142315615
22. Skobelev D.O. Building the infrastructure for transforming Russian industry towards better resource efficiency and environmental performance. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021;8(2):483–493.
23. Roslyakov P.V., Cherkasskii E.V., Guseva T.V. et al. Process-Related Standardization of Thermal Electric Power Facilities: The Best Available Techniques and General Binding Rules. *Thermal Engineering*. 2021;68(10):735–742. doi:10.1134/S0040601521100050
24. Kaplan R.S., Norton D.P. Using the Balanced Scorecard as a Strategic Management System. *Harvard Business Review*. 1996;(1):365.
25. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Interfaces*. 1994;24(6):19–43.
26. Gamidullaeva L.A., Tolstykh T.O., Shmeleva N.V. *Promyshlennyye i territorial'nye ekosistemy v kontekste ustoychivogo razvitiya: monografiya = Industrial and territorial ecosystems in the context of sustainable development : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:160. (In Russ.)
27. Johnson-Kanda I., Yawson R.M. Complex Adaptive Leadership for Organization and Human Development. *Proceedings of the 55th Annual Eastern Academy of Management Conference (Providence, RI, USA, 2–5 May 2018)*. 2018:1–14,19.
28. Gamidullaeva L.A., Tolstykh T.O., Shmeleva N.V. Methodology of complex assessment of industrial ecosystem potential 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.)
29. Tolstykh T.O., Gamidullaeva L.A., Shmeleva N.V. Methodological aspects of project portfolio formation in the innovation ecosystem. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;(1):5–23. (In Russ.)
30. Grumadaite K., Jucevičius G. Strategic Approaches to the Development of Complex Organisational Ecosystems: The Case of Lithuanian Clusters. *Sustainability*. 2022;14:15697. doi:10.3390/su142315697

31. Stanczyk S. Organisational ecosystem and stakeholders view. In search of epistemological logic in management. *International Journal of Economics and Business Research*. 2017;14:268–283.
32. Cindea I. Complex systems-new conceptual tools for international relations. *Perspectives*. 2006;14:46–70.
33. Gamidullaeva L.A. Industrial cluster of the region as a localized ecosystem: the role of factors of self-organization and collaboration. *π-Economy*. (In Russ.). 2023;16(1): 62–82. doi:10.18721/JE.16105

Данная статья является переводной версией статьи авторов, опубликованной в журнале Sustainability (Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L., Krasnobaeva V. The Role of Collaboration in the Development of Industrial Enterprises Integration // Sustainability. 2023. № 15. P. 7180. URL: <https://doi.org/10.3390/su15097180>).

### **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-т, 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-т, 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)

#### **Лейла Айваровна Гамидуллаева**

доктор экономических наук,  
заведующий кафедрой маркетинга,  
коммерции и сферы обслуживания,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: gamidullaeva@gmail.com

#### **Leyla A. Gamidullaeva**

Doctor of economical sciences,  
head of the sub-department of marketing,  
commerce and service sector,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### **Виктория Сергеевна Краснобаева**

ассистент,  
Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСИС»  
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4)  
E-mail: krasnobaeva.viktoria@gmail.com

#### **Viktoriya S. Krasnobaeva**

Assistant,  
National Research Technological University  
"MISIS"  
(4 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 01.12.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2022**

**Принята к публикации/Accepted 29.12.2022**

## ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ УМНЫХ ГОРОДОВ КАК НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

**Е. В. Балахонова**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
m-a-r-t-a2005@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Целью проведенного исследования было изучение роли устойчивого инновационного развития умных городов в достижении целей устойчивого развития современного человечества. Рассмотрены концепция устойчивого развития, концепция умного города, существующие подходы к оценке умных городов на основе показателей и индексов. Показаны глобальные проблемы, в решении которых играет важную роль устойчивое инновационное развитие умных городов, рассмотрен опыт инновационного развития столицы России как умного города. *Материалы и методы.* Автором проведено кабинетное исследование, его информационную базу составили материалы официальных сайтов структурных подразделений Организации Объединенных Наций; нормативно-правовые акты Российской Федерации; данные с официального сайта мэра Москвы; материалы научных и учебных изданий; материалы аналитических, исследовательских и консалтинговых компаний, вторичная информация из периодических изданий и тематических интернет-порталов. *Результаты.* Проведенное исследование позволило выявить роль основанного на цифровизации всех областей жизнедеятельности города устойчивого инновационного развития умных городов в достижении определенных Организацией Объединенных Наций целей устойчивого развития современного человечества, в частности обеспечения открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов. *Выводы.* Установлено, что обеспечение более высокого качества жизни горожан, составляющих более половины численности населения современного урбанизированного мира, способствует устойчивому развитию человечества, удовлетворяя потребности настоящего и будущих поколений в экономических, социальных, культурных и природоохранных аспектах.

**Ключевые слова:** концепция устойчивого развития, цели устойчивого развития, устойчивые инновации, устойчивое инновационное развитие, концепция умного города, цифровизация умных городов, инновационное развитие умных городов

**Для цитирования:** Балахонова Е. В. Инновационное развитие умных городов как необходимое условие достижения целей устойчивого развития // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 37–55. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-2

## INNOVATIVE DEVELOPMENT OF SMART CITIES AS A NECESSARY CONDITION FOR ACHIEVING THE GOALS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

**E.V. Balakhonova**

Penza State University, Penza, Russia  
m-a-r-t-a2005@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The purpose of the study was to study the role of sustainable innovative development of smart cities in achieving the goals of sustainable development of modern humanity. The concept of sustainable development, the concept of a smart city, existing approaches to the assessment of smart cities based on indicators and indices are considered. Global problems are shown, in the solution of which the sustainable innovative development of smart cities plays an important role, the experience of innovative development of the Russian capital as a smart city is considered. *Materials and methods.* The author conducted a desk study, its information base included materials from the official websites of the United Nations structural units; regulatory legal acts of the Russian Federation; data from the official website of the Mayor of Moscow; materials of scientific and educational publications; materials of analytical, research and consulting companies, secondary information from periodicals and thematic Internet portals. *Results.* The conducted research made it possible to identify the role of digitalization-based sustainable innovative development of smart cities in achieving the goals of sustainable development of modern humanity defined by the United Nations, in particular, ensuring openness, security, resilience and environmental sustainability of cities and human settlements. *Conclusions.* It is established that ensuring a higher quality of life for citizens, who make up more than half of the population of the modern urbanized world, contributes to the sustainable development of mankind, meeting the needs of present and future generations in economic, social, cultural and environmental aspects.

**Keywords:** sustainable development concept, sustainable development goals, sustainable innovation, sustainable innovation development, smart city concept, digitalization of smart cities, innovative development of smart cities

**For citation:** Balakhonova E.V. Innovative development of smart cities as a necessary condition for achieving the goals of sustainable development. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):37–55. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-2

### **Введение**

В последние десятилетия современная цивилизация сталкивается со все более острыми проблемами глобального характера, от возможности решения которых напрямую зависят как устойчивость ее развития, так и перспективы выживания. Глобальные проблемы обусловлены общемировыми тенденциями развития человечества в XX в., изначально направлявшимися базовыми для западноевропейских стран стереотипами социально-экономического поведения и ценностными установками; они принципиально важны для населения Земли; их решение невозможно без согласования усилий всех стран и народов [1, с. 11].

В условиях активно идущей во всемирном масштабе урбанизации и все большего преобладания численности городского населения как один из механизмов гармонизации процессов общественного развития и достижения целей устойчивого развития в настоящий момент рассматривается концепция устойчивого инновационного развития умных городов.

### *Материалы и методы*

Автором проведено кабинетное исследование, его информационную базу составили материалы официальных сайтов структурных подразделений Организации Объединенных Наций (ООН); нормативно-правовые акты Российской Федерации; данные с официального сайта мэра Москвы; материалы научных и учебных изданий; материалы аналитических, исследовательских и консалтинговых компаний, вторичная информация из периодических изданий и тематических интернет-порталов.

### *Результаты и обсуждение*

Концепция устойчивого развития стала теоретической основой деятельности, направленной на решение глобальных проблем в духовной и материальной сферах. Термин «устойчивое развитие» (англ. «sustainable development») был впервые использован в середине XX в. применительно к локальным экосистемам в природопользовании. Далее он был перенесен в глобальную экологию, а начиная с 1980-х гг. введен в широкий научный оборот, получив наибольшее распространение в связи с публикацией в 1987 г. доклада (отчета) «Наше общее будущее», подготовленного возглавляемой Г. Х. Брундтланд Международной комиссией по окружающей среде и развитию, созданной ООН с целью изучения проблем взаимоотношений природы и человеческого общества, экологических последствий антропогенного воздействия на биосферу и путей его (данного воздействия) нормализации [1, с. 21].

Надо сказать, что отсутствие общепринятого определения термина «устойчивое развитие» породило дискуссию о его смысловой нагрузке. Вплоть до того, что высказывается точка зрения, в соответствии с которой устойчивость и развитие не совместимы и одновременно не достижимы, поскольку развитие всегда сопряжено с какими-либо изменениями, а устойчивость – с инвариантностью, т.е. сохранением постоянства тех или иных параметров системы. Если говорить о переводе английского «sustainable development» на русский язык, то словосочетание «непрерывно поддерживаемое долговременное развитие» отражает его смысл более полно [1, с. 25]. При данном варианте развития становится возможен целенаправленный контроль за непрерывно идущими в экологической, экономической и социальной подсистемах разнообразными изменениями. Помимо этого, велика вероятность прогнозирования соответствующих изменений, что позволит эффективно управлять наиболее неустойчивыми и неблагоприятными состояниями и диспропорциями [2, с. 103].

В вышеупомянутом отчете Брундтланд устойчивое развитие определялось как отвечающее потребностям нынешнего поколения и не лишаящее будущие поколения возможности удовлетворять свои потребности. В нем отмечалось, что концепция устойчивого развития предполагает некоторые ограничения эксплуатации природных ресурсов, которые тем не менее относительно определены современными уровнями развития техники и социальной организации, а также способностью биосферы адаптироваться к последствиям деятельности человека. Как технические аспекты, так и аспекты социальной организации возможно контролировать и совершенствовать, двигаясь в новую эру экономического роста [3].

Представленная в отчете Брундтланд концепция устойчивого развития положила начало обширной дискуссии о взаимосвязи между устойчивостью и инновациями. Сочетание двух концепций – устойчивости и инноваций – сформировало единую теоретическую базу перехода к новой парадигме устойчивого развития, вследствие чего в научный оборот были введены такие термины, как: «устойчивые инновации», «эко-инновации» и «инновации на основе устойчивого развития». Первый из них является наиболее емким и предполагает учитывающее ограниченность природных ресурсов и возможностей окружающей среды к восстановлению создание способствующих удовлетворению человеческих потребностей и развитию соответствующих институтов новых продуктов, процессов, услуг и технологий. Устойчивые инновации обеспечивают улучшение экономических, экологических и социальных показателей в краткосрочной и долгосрочной перспективах [4, с. 33].

Без устойчивых инноваций в экономической, экологической и социальной сферах будет невозможно достижение определенных в принятой ООН в 2015 г. «Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» [5] целей. В этом документе содержатся не только сами цели в области устойчивого развития современного человечества (всего их 17 [6]), но и план их достижения в течение предстоящих 15 лет. Выполнение этого плана будет способствовать искоренению нищеты, обеспечению защиты Земли, повышению качества жизни и улучшению перспектив для населения всех стран:

1. Повсеместная ликвидация нищеты во всех ее формах.
2. Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности, улучшение питания и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства.
3. Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте.
4. Обеспечение всеохватного и справедливого качественного образования и поощрение возможности обучения на протяжении всей жизни для всех.
5. Обеспечение гендерного равенства и расширение прав и возможностей всех женщин и девочек.
6. Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех.
7. Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии.
8. Содействие поступательному, всеохватному и устойчивому экономическому росту, полной и производительной занятости и достойной работе для всех.
9. Создание стойкой инфраструктуры, содействие всеохватной и устойчивой индустриализации и инновациям.
10. Сокращение неравенства внутри стран и между ними.
11. Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов.
12. Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства.
13. Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями.

14. Сохранение и рациональное использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития.

15. Защита и восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное лесопользование, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процесса деградации земель и прекращение процесса утраты биоразнообразия.

16. Содействие построению миролюбивого и открытого общества в интересах устойчивого развития, обеспечение доступа к правосудию для всех и создание эффективных, подотчетных и основанных на широком участии учреждений на всех уровнях.

17. Укрепление средств осуществления и активизация работы в рамках глобального партнерства в интересах устойчивого развития.

Далее подробно остановимся на одиннадцатой цели – обеспечении открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов.

Современный мир все более урбанизируется – в 2007 г. численность городского населения превысила отметку в 50 % от общей численности населения мира, предполагается, что к 2030 г. этот показатель достигнет 60 % [7], а в 2050 г. – 68 % [8] при общей численности населения в 9,7 млрд человек [9]. Численность населения крупнейших городских агломераций не только сопоставима, но даже и превышает численность населения отдельных стран. По состоянию на 2022 г. первая десятка их рейтинга выглядит следующим образом: Токио-Йокогама (Япония) – 37,732 млн человек, Джакарта (Индонезия) – 33,756 млн человек, Дели (Индия) – 32,226 млн человек, Гуанчжоу-Фошань (Китай) – 26,940 млн человек, Мумбаи (Индия) – 24,972 млн человек, Манила (Филиппины) – 24,922 млн человек, Шанхай (Китай) – 24,073 млн человек, Сан-Паулу (Бразилия) – 23,086 млн человек, Сеул-Инчхон (Южная Корея) – 23,016 млн человек, Мехико (Мексика) – 21,804 млн человек. Москва с населяющими ее 17,332 млн человек находится на 18-м месте этого рейтинга [10].

Городские поселения, особенно крупные и сверхкрупные, продолжают стремительно расти. По прогнозам, к 2030 г. в мире будет 43 мегаполиса с населением более 10 млн человек, большинство которых расположено в развивающихся регионах [8]. Показатель общего прироста численности населения (в расчете на год) разнится по регионам мира и, по оценке ООН, выглядит следующим образом (рис. 1): Европа – 0,3 %, Северная Америка – 1,0 %, Латинская Америка – 1,3 %, Океания – 1,4 %, Азия – 2,2 %, Африка – 3,6 %. К 2030 г. прогнозируется повсеместное замедление темпов прироста численности городского населения (кроме Европы, где он останется неизменным): Европа – 0,3 %, Северная и Латинская Америка – по 0,9 %, Океания – 1,2 %, Азия – 1,5 %, Африка – 3,3 %. К 2050 г. этот показатель во всех регионах опустится ниже 1 %, исключение составят лишь Океания (1,1 %) и Африка (2,7 %).

Как считают эксперты ООН, увеличение численности населения и ожидаемый рост уровня его благосостояния создадут значительную дополнительную нагрузку на природные ресурсы и экосистемы (уже сейчас города потребляют 75 % мировых природных ресурсов: первичной энергии, сырья, воды и продовольствия [12, с. 24]). Необходимо надлежащее регулирование этого процесса (в первую очередь в странах с низким и средним уровнем доходов, где прогнозируются, как это показано выше, наиболее значительные темпы

урбанизации), иначе человечество неминуемо столкнется с дополнительными социальными, экономическими и экологическими проблемами в области удовлетворения потребностей растущего городского населения, в частности в жилье, транспорте и инфраструктуре, в занятости и основных услугах (в первую очередь в сферах образования и здравоохранения).

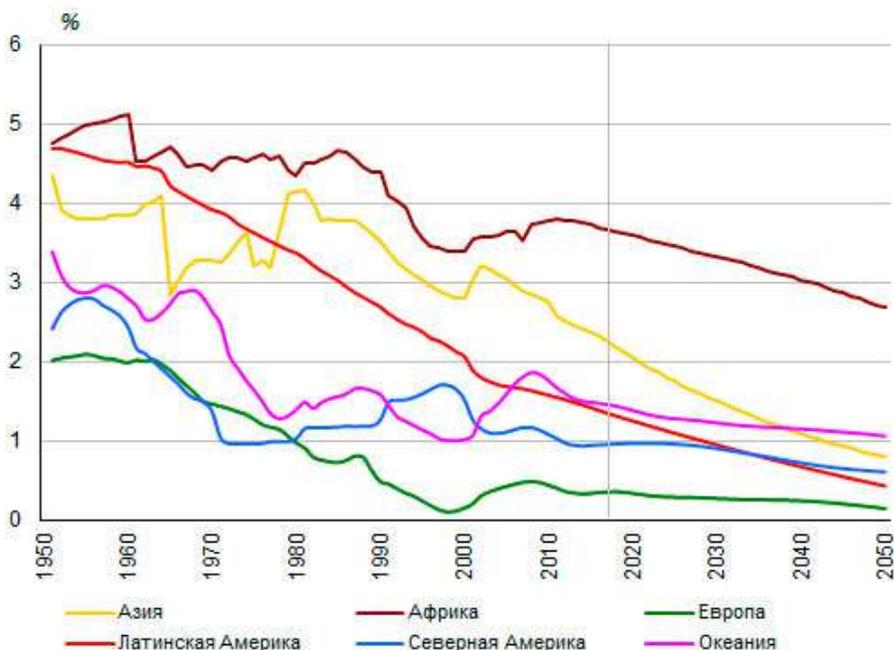


Рис. 1. Прирост численности городского населения по основным регионам мира, 1950–2050 гг., в процентах [11]

Минимизировать проблемы данного рода, а также способствовать устойчивому развитию городов призвана концепция умного города (англ. «Smart City»), являющаяся одной из самых экономически эффективных градостроительных концепций. Она предполагает использование в управлении городом новейших цифровых технологий, следование экологическим принципам и экономии ресурсов при достижении поставленных целей развития города [13, с. 57]. Точкой отсчета в истории умных городов стала разработка в 1970-х гг. муниципалитетом Лос-Анджелеса программы городского развития, основанной на накоплении и анализе больших данных. В научный оборот термин «Smart City» вошел в начале 1990-х гг., когда он стал использоваться в зарубежной урбанистике, поскольку возникла необходимость отразить растущую зависимость развития городов от новых технологических решений и инноваций.

За прошедшее время так и не было выработано однозначного и единодушно принятого научным сообществом толкования термина «умный город», хотя проведено и продолжает проводиться значительное количество тематических исследований, публикационная активность по данной проблеме весьма высока (значительный интерес к концепции умного города со стороны академической общественности проявляется с 2011 г. [13, с. 59]) – множество

авторов предлагают свои трактовки содержания концепции умного города и описывают основные характеристики таких городов.

В настоящее время наиболее часто цитируется размещенное в интернет-энциклопедии Википедия определение умного города, автором которого является доктор делового администрирования, сотрудник департамента науки и технологий в обществе Политехнического института и государственного университета Виргинии (Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech)) Сэм Муса. Его точка зрения изложена в опубликованной в 2016 г. в «Журнале телекоммуникационных систем и управления» («Journal of Telecommunications System & Management») статье «Умные города – дорожная карта развития» [14].

Муса рассматривает умный город как концепцию интеграции нескольких информационных и коммуникационных технологий с интернетом вещей для управления городским имуществом, включая информационные системы местных администраций, школы, библиотеки, транспорт, больницы, электростанции, системы водоснабжения и управления отходами, правоохранительные органы и другие общественные службы. Цель создания умного города он видит в улучшении качества жизни с помощью информационно-коммуникационных технологий, дающих возможность повышать эффективность услуг и удовлетворять потребности горожан, сделать их жизнь легче и безопаснее. При этом информационно-коммуникационные технологии могут использоваться как инструмент жизнеобеспечения и совершенствования услуг и бизнес-процессов, а также для защиты персональных данных и ключевых объектов городской инфраструктуры, снижения уровня преступности и решения многих других актуальных для современного города задач. «Умный» город предлагает технологические решения, которые дают картину того, что в нем происходит, как он развивается и как обеспечить лучшее качество жизни в нем. «Умный» город объединяет и вовлекает своих жителей и соединяет всю городскую инфраструктуру посредством электронных решений.

Значительный вклад в разработку концепции умного города внесли крупнейшие технологические и консалтинговые компании, международные организации.

В трактовке Британского института стандартов (British Standard Institution (BSI)) умный город – это эффективная интеграция физических, цифровых и человеческих систем в искусственно созданной среде с целью обеспечить устойчивое, благополучное и всестороннее будущее для граждан [15].

Эксперты международной консалтинговой компании McKinsey (McKinsey & Company) указывают, что современная модель умного города предусматривает не только различные способы применения умных технологических решений, но и активное вовлечение населения и бизнес-структур в их развитие, тогда как в начальной стадии формирования концепции умного города она была направлена преимущественно на развитие технологий и инфраструктуры [16].

Определение умных устойчивых городов, разработанное Оперативной группой по умным устойчивым городам Европейской экономической комиссии ООН гласит: «"Умный" устойчивый город – это инновационный город, использующий информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) и другие средства для повышения уровня жизни, эффективности деятельности и услуг

в городах, а также конкурентоспособности при обеспечении удовлетворения потребностей настоящего и будущих поколений в экономических, социальных, культурных и природоохранных аспектах». В рамках данного подхода город рассматривается как комплексная многоаспектная и многокомпонентная система [17].

Изначально сугубо технико-технологический подход к концепции умного города постепенно сменился расширительным, охватывающим широкий комплекс аспектов функционирования современных городов и нацеленным на повышение социально-экономической и политической эффективности их жизнедеятельности, создание климата, необходимого для формирования креативного класса специалистов [13, с. 58].

Разницу в подходах к содержанию концепции умного города отражают представленные на рис. 2 последовательно оформившиеся ее версии: умный город 1.0, 2.0 и 3.0. Концепцию трех поколений умных городов создал специалист по городскому и климатическому стратегированию Бойд Коэн [18]; в настоящее время она является одной из наиболее авторитетных.

	УМНЫЙ ГОРОД 1.0 Эффективная инфраструктура	УМНЫЙ ГОРОД 2.0 Первичная цифровизация	УМНЫЙ ГОРОД 3.0 Smart Sustainable City / Цифровая экосистема
Ключевые направления развития города	<ul style="list-style-type: none"> <li>Технологическое переоснащение</li> <li>Внедрение IT и полувеликоматических решений в физическую инфраструктуру</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Комплексные решения для различных городских сфер</li> <li>Внедрение связанных систем на основе Интернета вещей</li> <li>Формирование первичной цифровой архитектуры</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Интегрированные интеллектуальные решения для управления в режиме реального времени</li> <li>Цифровая трансформация секторов</li> <li>Формирование единой цифровой экосистемы технологий и сервисов</li> </ul>
Ключевые стейкхолдеры, вовлеченные в развитие умного города	Поставщики технологических решений и услуг	Городские власти. Жители города мало задействованы в управлении городом	Партнерства бизнеса, органов власти и граждан. Жители города активно участвуют во внедрении новых технологий, а также являются одним из основных источников данных
Цифровая инфраструктура	<ul style="list-style-type: none"> <li>Проводная наземная связь</li> <li>Исправленные системы сбора и обработки данных на основе RFID-технологий</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3G/4G, оптические сети</li> <li>Интернет вещей</li> <li>Анализ больших данных</li> <li>Интеллектуальные системы управления</li> <li>Цифровые платформы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>5G, семантические сети, открытые данные</li> <li>Анализ больших данных, облачные вычисления</li> <li>Цифровые двойники</li> <li>Единые интегрированные цифровые платформы обмена данными (металлабформы)</li> </ul>

Рис. 2. Этапы развития концепции умного города [19, с. 5]

В умном городе 1.0 еще нет общей стратегии развития, технологические компании играют ведущую роль, лоббируя использование предлагаемых ими решений для автоматизации отдельных, не связанных друг с другом компонентов городского хозяйства. Умный город 2.0 уже предполагает взаимосвязь и координацию ранее самостоятельных инициатив с максимально возможным числом источников информации; городские администраторы определяют будущее своих городов и то, какую роль в его построении будут играть интеллектуальные технологии и другие инновации, понимая, что технологические решения являются важнейшим фактором, способствующим повышению качества жизни населения. В умном городе 3.0 завершено объединение всех компонентов в единое целое, инфраструктура функционирует на основе использования интеллектуальных технологий; вместо технологического подхода к поставщикам (умный город 1.0) или управляемой городом модели с поддержкой технологий (умный город 2.0) ведущие умные города начинают использовать модели социальной интеграции, совместного творчества граждан, чтобы помочь управлять следующим поколением умных городов.

На рис. 2 наглядно показано, что ключевые направления развития современного умного города связаны с цифровизацией всех областей его жизнедеятельности. Можно сказать, что умный город – это инновационный город, использующий цифровые технологии для повышения уровня жизни, эффективности деятельности и оказания услуг в городе, а также конкурентоспособности при обеспечении удовлетворения потребностей настоящего и будущих

поколений в экономических, социальных, культурных и природоохранных аспектах [20].

Уровень цифровизации современных умных городов разнится. Отслеживать и контролировать достижение результатов в данной области, а также проводить их (умных городов) сравнение по этому показателю позволяет Индекс цифровых городов (Digital Cities Index, DCI) 2022 [21], рассчитанный созданным в 2021 г. британской медиа-компанией The Economist Group проектом «Economist Impact» при поддержке японской компании Nippon Electric Corporation. В рейтинг Индекса вошли 30 городов из 24 стран. Оценка масштабов их цифровизации проводилась в четырех ключевых сегментах: связь, услуги, культурная сфера и устойчивое развитие. Лидерами Индекса с наиболее высокими показателями цифровизации стали столицы Дании (Копенгаген), Нидерландов (Амстердам), Китая (Пекин), Великобритании (Лондон) и Южной Кореи (Сеул), при этом два последних из них разделили между собой четвертое место рейтинга.

Основные выводы по результатам проведенного в рамках расчета Индекса цифровых городов 2022 исследования состоят в следующем.

В области связи:

1. Во многих городах уровень сигнала в сетях слишком низок либо ограничен, что не позволяет обеспечить комплексную цифровую трансформацию (около 50 % участников рейтинга в оценке цифровизации связи получили менее 70 баллов из 100 возможных). В условиях пандемии коронавируса по всему миру выросли инвестиции со стороны муниципальных властей в возможности подключения, в частности было увеличено предложение бесплатного Wi-Fi и количество точек доступа.

2. Вошедшие в рейтинг города готовы к внедрению технологии 5G, однако развертывание сетей пятого поколения мобильной связи должно быть комплексным, обеспечивающим полную реализацию концепции умных городов.

В области оказания услуг:

1. Лидерами в сфере услуг электронного правительства стали города как с высоким (Сингапур), так и требующим повышения этого показателя (Нью-Дели) уровнем доходов населения.

2. Города – участники рейтинга – широко используют цифровые технологии в здравоохранении, что позволило большинству из них набрать более 75 баллов. Активизации этого процесса способствовала пандемия коронавируса.

3. Азиатские города опережают представителей других регионов мира в сфере цифровых финансов – тройку лидеров по этому показателю составили Пекин, Сеул и Гонконг.

В культурной сфере:

1. Уровень цифровых навыков и удовлетворенности работой порталов электронного правительства оказался значительно выше в городах с формирующимся рынком, особенно азиатских: Нью-Дели, Дубае, Джакарте, Пекине, Мехико, Маниле и Бангкоке.

2. Европейские и североамериканские города (Лондон, Торонто, Париж, Даллас, Нью-Йорк и Вашингтон) стали лидерами рейтинга относительно политики открытого доступа к данным и их использования для подотчетности, инноваций и социального воздействия.

В области устойчивого развития:

1. Показатели устойчивости превысили общий средний показатель DCI. Копенгаген, Сеул и Торонто набрали более 90 баллов из 100 за использование цифровых технологий для поддержания устойчивости городов, треть участников рейтинга получила максимальный балл за интеллектуальное управление коммунальными услугами. Однако все крупные города с формирующимся рынком (за исключением Пекина) получили оценки ниже среднего.

2. Эффективность и приемлемость следующей волны инноваций в цифровых городах будут напрямую зависеть от участия граждан в этом процессе. Инициативы же первых десятилетий развития умных городов, продемонстрировавшие возможности технологий для улучшения городских услуг и качества жизни, как правило, осуществлялись сверху вниз без должной вовлеченности населения.

Города, представляющие Россию, в Индекс цифровых городов 2022 не вошли. Сложно сказать, вызвано ли это реальным отставанием (в первую очередь умного мегаполиса Москвы) или политикой отмены, проводимой в последнее время в связи с обострением геополитической ситуации в отношении нашей страны.

К числу наиболее известных систем индикаторов умных городов принадлежит Smart City Index (SCI) швейцарского Международного института развития менеджмента (International Institute for Management Development, IMD), который был разработан им совместно с Сингапурским университетом технологии и дизайна (Singapore University of Technology and Design (SUTD)). Smart City Index был впервые рассчитан в 2019 г. Он основан на опросе мнения 120 жителей каждого из участвующих в рейтинге городов (всего их 118) по двум направлениям: инфраструктура и технологии, которые оцениваются в пяти областях (здравоохранение, безопасность, мобильность, возможности, перспективы развития и роста). Итоговый балл каждого города учитывает результаты опросов за последние три года. Города распределены на четыре группы на основе показателя Индекса человеческого развития ООН (Human Development Index, HDI) для экономики, частью которой они являются. Лидерами рейтинга ежегодно становятся столицы стран Северной Европы и азиатские мегаполисы, его первую строчку занимает Сингапур [22].

Российские умные города ежегодно включаются в Smart City Index. По результатам 2021 г. Москва заняла в его рейтинге 54-е место, поднявшись на две позиции относительно 2020 г. (когда рост по сравнению с 2019 г. составил сразу 16 пунктов), Санкт-Петербург оказался на 79-м месте, уступив прошлогоднему рейтингу шесть пунктов [23].

Гораздо более высоким оказалось положение Москвы в Индексе инновационных городов мира, представленном в 2022 г. британской компанией Paymentsense Limited. Она заняла 12-е место среди включенных в рейтинг 50 городов, уступив лишь Вашингтону, Берлину, Парижу, Канберре, Пекину, Оттаве, Риму, Лондону, Мадриду, Бразилии и Стокгольму. По каждому из них анализировались следующие данные:

- 1) количество зарегистрированных в Google патентных заявок;
- 2) количество регистраций новых предприятий в 2021 г.;
- 3) количество университетов и их рейтинг RUR World University (университеты являются учреждениями, у которых часто есть время и ресурсы для инноваций в различных областях);

4) среднемесячные объемы поиска и тенденции поиска по запросу «как начать бизнес»;

5) количество компаний, зарегистрированных на глобальной краудфандинговой платформе для стартапов Kickstarter, и их средняя стоимость [24].

И хотя в данном случае предметом анализа стали параметры, выходящие за рамки атрибутов умного города, они служат гармоничным дополнением к характеристике его инновационного развития и косвенно свидетельствуют о готовности значительной части населения Москвы к восприятию инноваций в разных областях своей жизни. Это подтверждает и тот факт, что в 2020 г. в международном рейтинге 1000 лучших городов для стартапов от израильского исследовательского центра StartupBlink Москва оказалась на девятом месте [25]. При этом экспертами были особенно отмечены потенциал российской столицы в развитии искусственного интеллекта и больших данных, а также в вопросах взаимодействия высоких технологий и креативных индустрий. Через год Москва вошла в семерку лидеров международного рейтинга, который ежегодно составляет американский аналитический центр Intelligent Community Forum [26]. В данном случае экспертное жюри высоко оценило следующие параметры: развитые системы связи, высокая цифровая грамотность населения, поддержка и внедрение инноваций.

По состоянию на 2021 г. в столичной инновационной экосистеме было более 1 тыс. научных организаций, около 28 тыс. промышленных предприятий, почти 38 тыс. IT-компаний и свыше 1 тыс. создающих поддерживающую инфраструктуру организаций [27]. В Москве создана развитая система поддержки инноваций, город стал масштабным инновационным хабом, внутри которого идет активное внедрение современных технологий в инфраструктуру.

Центральным звеном столичной экосистемы поддержки и развития инноваций является Московский инновационный кластер [28]. Это единственный в мире информационный кластер, не привязанный к определенной территории; его создатели предпочли физическому присутствию полноценную цифровую экосистему поддержки, разработки, создания и внедрения инноваций в российской столице. В 2019 г., когда работа кластера начиналась, его участниками могли стать только московские компании; позднее возможность присоединиться к нему получили региональные организации и не проживающие в столице граждане с инновационными идеями или проектами и большим желанием реализовать их.

Кластер предоставляет предпринимателям возможность найти нужные сервисы и ресурсы, чтобы вывести свой бизнес на новый уровень, а именно:

- 1) сопровождение инновационных проектов;
- 2) частные и государственные инвестиции;
- 3) субсидии и гранты для реализации инновационных проектов;
- 4) онлайн-сервисы на IT-платформе i.moscow (она является цифровым двойником Московского инновационного кластера, а скорее его аватаром в сети, где участник кластера, помимо уже перечисленного, может найти партнеров, получить поддержку от экспертов или принять участие в технологическом конкурсе);

5) доступ к инновационной инфраструктуре города [29].

С конца 2021 г. в рамках Московского кластера работает «Академия инноваторов» [30] – практико-ориентированная программа, позволяющая начинающим предпринимателям, студентам и молодым ученым трансформировать

свои инновационные идеи в полномасштабный бизнес. Ключевая миссия Академии состоит в том, чтобы помочь реализации предпринимательского потенциала российских граждан. Для участников разработан курс лекций и индивидуальные сессии с наставниками, которые могут помочь определить рыночную нишу, составить бизнес-план, дадут рекомендации по формированию команды и привлечению инвестиций. Поскольку программа ориентирована на запуск инновационных проектов, ее отдельные модули посвящены патентованию разработок, их тестированию и внедрению, созданию минимально жизнеспособного продукта с максимальным использованием инфраструктуры поддержки инноваций.

Возможность испытания своих разработок в городской среде столицы, которую предоставляет стартапам реализуемая Агентством инноваций Москвы программа пилотного тестирования инноваций, является для них весьма ценным опытом. Успешная апробация на базе столичных компаний практически гарантирует эффективное развитие бизнес-проекта как в Москве, так и в любом другом городе. В рамках программы пилотного тестирования инноваций в российской столице создана крупнейшая в мире сеть государственных и коммерческих пилотных площадок.

Цифровая экосистема услуг и сервисов развивается в столице России на протяжении более 10 лет. К 2020-м гг. Москва стала современным умным городом мирового уровня, в ней не осталось не вовлеченных в инновационное цифровое развитие отраслей городского хозяйства.

Перечислим лишь некоторые из реализованных в столице проектов [27]:

1. В сфере человеческого и социального капитала – единая цифровая система в области здравоохранения (Единая медицинская информационно-аналитическая система (ЕМИАС)), образования (Московская электронная школа (МЭШ)) и социальной защиты (решения, доступ к которым жители города получают посредством использования социальной карты москвича).

2. В области городской среды – нацеленная на создание комфортных условий для жизни во всех районах и поселениях столицы программа «Мой район», а также применяемые в сфере ЖКХ, строительства и перспективного развития города интегральные решения.

3. В сфере экономики – охарактеризованный ранее Московский инновационный кластер, способствующий созданию стартапов и компаний, которые могут обеспечить технологическое лидерство не только столицы, но и страны в целом.

4. В области связи – городские центры обработки данных, развитая, местами не имеющая аналогов, инфраструктура связи (в частности, скоростной, доступный даже в метро и тоннелях интернет).

5. В сфере безопасности – не имеющая аналогов в России и одна из наиболее передовых в мире система распознавания лиц, созданная во время пандемии система «Социальный мониторинг», позволяющая не только сдерживать распространение заболеваемости, но и оптимизировать работу предприятий здравоохранения.

6. В транспортной сфере – оплата проезда в городском транспорте с помощью системы распознавания лиц, умная система контроля за движением автобусов (электробусов), интеграцией разных видов транспорта (метро, Московские центральные диаметры, наземный транспорт), за трафиком с целью предотвращения пробок и улучшения транспортной доступности.

7. В сфере деятельности цифрового правительства – система госуслуг и многофункциональных центров, портал mos.ru как единое окно доступа гражданина к государственным сервисам, система обратной связи с жителями («Наш город», «Добродел», Crowd.mos.ru и другие сервисы).

Несмотря на связанные с геополитическим кризисом 2022 г. масштабный уход с российского рынка иностранных IT-компаний и релокацию отечественных IT-специалистов в другие страны, Москва сохранила лидерство в области внедрения цифровых решений и инноваций в повседневную жизнь горожан. В течение прошлого года столица России была номинирована на 15 отечественных и пять международных премий, престижные награды завоевали 30 городских проектов в сфере цифровых технологий. Зарубежными экспертами в 2022 г. были отмечены 10 московских проектов, в частности интерактивный гид «Узнай Москву», который получил звание «Проект-чемпион» международной премии WSIS Prizes 2022 (World Summit on the Information Society Prizes 2022) [31]. Эта премия вручается действующим под эгидой ООН в области информационно-коммуникационных технологий Международным союзом электросвязи (Швейцария), она отмечает проекты, способствующие обеспечению устойчивого развития посредством использования возможностей информационно-коммуникационных технологий.

В настоящее время практически все принимающиеся властью Москвы решения в определенной степени базируются на сборе и анализе больших данных и на перспективном прогнозировании, в том числе с применением искусственного интеллекта. Несмотря на то, что цифровое инновационное развитие Москвы началось позднее и с худшими стартовыми условиями, нежели у многих умных городов Европы, Северной Америки и Азии, как уже было сказано ранее, в последние годы столица России не только включается в рейтинги умных и инновационных городов, но и занимает в них довольно высокие, вплоть до лидирующих, позиции.

Дальнейшая траектория развития обозначена в стратегии цифровизации Москвы «Умный город – 2030», которая призвана не только обеспечить стабильный рост уровня жизни и благосостояния жителей столицы, но и создать централизованную, сквозную и прозрачную систему управления городом на основе больших данных и искусственного интеллекта.

В стратегии сформулированы следующие принципы умного города Москвы [32]:

- 1) умный город для человека;
- 2) участие жителей в управлении городом;
- 3) искусственный интеллект для решения городских задач;
- 4) цифровые технологии для создания безбарьерной среды;
- 5) развитие города совместно с бизнесом и научным сообществом;
- 6) главенство цифрового документа над его бумажным аналогом;
- 7) сквозные технологии во всех сферах городской жизни;
- 8) отечественные решения в сфере цифровых технологий;
- 9) зеленые цифровые технологии.

Стратегия «Умный город – 2030» предусматривает внедрение во все области жизнедеятельности российской столицы следующих сквозных технологий: искусственный интеллект, интернет вещей, блокчейн, нейроинтерфейсы, большие данные и предиктивная аналитика, технологии виртуальной, дополненной

и смешанной реальности, 5G и 3D-моделирование. Распределение внедрения и использования этих технологий по годам представлено на рис. 3.



Рис. 3. Временные рамки внедрения сквозных технологий в ходе реализации стратегии цифровизации Москвы «Умный город – 2030» [20]

Москва должна не только быть инновационным умным городом, являясь столицей, лицом страны, но и выполнить одновременно роль экспериментальной площадки и локомотива, который потянет за собой инновационное цифровое развитие остальных городов России. Проект цифровизации городского хозяйства «Умный город» [33] реализуется с 2021 г. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации в рамках национального проекта «Жилье и городская среда» [34] и национальной программы «Цифровая экономика» [35]. Накопленный гораздо раньше начавшей процесс создания умного города и цифровизации всех сфер его хозяйства Москвой опыт будет чрезвычайно полезен в масштабах всей страны.

### *Заключение*

В настоящее время реализация концепции умного города признается научным и профессиональными сообществами как эффективный способ достижения одной из сформулированных ООН целей в области устойчивого развития современного человечества – обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов.

Умные города все чаще и прочнее связываются с концепцией устойчивого инновационного развития, достигающегося посредством цифровизации всех областей жизнедеятельности города. В первую очередь это обеспечивает более высокое качество жизни горожан, однако, учитывая степень урбанизации современного мира, дает и более значимый эффект, способствуя устойчивому развитию современного человечества.

### *Список литературы*

1. Устойчивое развитие: новые вызовы : учебник для вузов / под общ. ред. В. И. Данилова-Данильяна, Н. А. Пискуловой. М. : Аспект Пресс, 2015. 336 с.
2. Чиркунова Е. К., Шехова Н. В. Инновационные подходы к реализации целей устойчивого развития в современной российской экономике // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2021. Т. 12, № 2. С. 101–110.
3. Развитие и международное экономическое сотрудничество: проблемы окружающей среды. Доклад Всемирной комиссии по вопросам окружающей среды и развития // Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.un.org/ru/ga/pdf/brundtland.pdf> (дата обращения: 25.12.2022).
4. Гамидуллаева Л. А., Досжан Р. Д. Устойчивые инновации: систематический обзор литературы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 3. С. 32–45.
5. Повестка дня в области устойчивого развития // Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/> (дата обращения: 24.12.2022).
6. Цели в области устойчивого развития // Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 24.12.2022).
7. Цели в области устойчивого развития. Цель 11: Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов // Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cities/> (дата обращения: 24.12.2022).
8. Пересмотр перспектив мировой урбанизации за 2018 год // Организация Объединенных Наций. Департамент по экономическим и социальным вопросам. URL:

- <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (дата обращения: 24.12.2022).
9. Демографические изменения // Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.un.org/ru/un75/shifting-demographics> (дата обращения: 24.12.2022).
  10. Largest urban agglomerations worldwide in 2022, by population // Statista.com. URL: <https://www.statista.com/statistics/912263/population-of-urban-agglomerations-worldwide/> (дата обращения: 24.12.2022).
  11. Прогноз городского и сельского населения мира, 2018 // Демоскоп Weekly. URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/2018/0775/barom03.php> (дата обращения: 25.12.2022).
  12. Матризаев Б. Д. Инновации, ориентированные на устойчивое развитие «умных городов»: ключевые проблемы и направления концептуального развития // Вестник Поволжского института управления. 2022. Т. 22, № 5. С. 23–34.
  13. Акимова О. Е., Волков С. К., Хрысева А. А. Концепция «Умный город»: эволюция, элементы и форма реализации // Теоретическая экономика. 2020. № 6. С. 55–63.
  14. Musa S. Smart Cities – A Roadmap for Development. URL: [https://www.researchgate.net/publication/312106742\\_Smart\\_Cities\\_A\\_Roadmap\\_for\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/312106742_Smart_Cities_A_Roadmap_for_Development) (дата обращения: 15.12.2022).
  15. Исаков Д. Топ-10 «умных городов» мира // MegaTrends. URL: <https://megatrends.su/blog/top-10-umnyh-gorodov-mira/> (дата обращения: 15.12.2022).
  16. Технологии умных городов: что влияет на выбор горожан? // McKinsey&Company. URL: [https://www.mckinsey.com/ru/~/\\_media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/Smart%20city%20solutions%20What%20drives%20citizen%20adoption%20around%20the%20globe/smartcitizenbook-rus.pdf](https://www.mckinsey.com/ru/~/_media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/Smart%20city%20solutions%20What%20drives%20citizen%20adoption%20around%20the%20globe/smartcitizenbook-rus.pdf) (дата обращения: 15.12.2022).
  17. Показатели «умных» устойчивых городов, разработанные ЕЭК ООН–МСЭ // Организация Объединенных Наций. Экономический и социальный совет. URL: [https://unesce.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/2015/ECE\\_HBP\\_2015\\_4.ru.pdf](https://unesce.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/2015/ECE_HBP_2015_4.ru.pdf) (дата обращения: 15.12.2022).
  18. Cohen B. The 3 Generations Of Smart Cities // Fast Company. URL: <https://www.fastcompany.com/3047795/the-3-generations-of-smart-cities> (дата обращения: 12.12.2022).
  19. Умный дом: обзор рынка интеллектуальных систем. М. : Агентство инноваций города Москвы, 2019. 37 с.
  20. Стратегия «Умный город – 2030. Сквозные технологии» // Официальный сайт мэра Москвы. URL: [https://www.mos.ru/upload/alerts/files/2\\_Tehnologii.pdf](https://www.mos.ru/upload/alerts/files/2_Tehnologii.pdf) (дата обращения: 10.12.2022).
  21. Digital Cities Index 2022 // Economist Impact. URL: <https://impact.economist.com/projects/digital-cities/2022-executive-summary/> (дата обращения: 10.01.2023).
  22. Рейтинг самых умных городов мира // Информационный портал NoNews. URL: <https://nonews.co/directory/lists/cities/smart-city-index> (дата обращения: 10.01.2023).
  23. Smart City Index 2021 // International Institute for Management Development. URL: [https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/#\\_smartCity](https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/#_smartCity) (дата обращения: 10.01.2023).
  24. The most innovative cities in the world in 2022 // Paymentsense. URL: <https://www.paymentsense.com/uk/blog/most-innovative-cities-report-2022/> (дата обращения: 10.01.2023).
  25. Global Startup Ecosystem Index 2021 // StartupBlink. URL: <https://www.startupblink.com/blog/global-startup-ecosystem-index/> (дата обращения: 10.01.2023).
  26. Москва вошла в топ-7 самых умных городов мира // Официальный сайт мэра Москвы. URL: <https://www.mos.ru/news/item/93279073/> (дата обращения: 10.01.2023).
  27. Валетов А. Инновации в большом городе. Как Москва становится «умным» мегаполисом // Стратегия. URL: <https://strategyjournal.ru/innovatsii/innovatsii-v->

- bolshom-gorode-kak-moskva-stanovitsya-umnym-megapolisom/ (дата обращения: 09.01.2023).
28. О кластере // Московский инновационный кластер. URL: <https://i.moscow/oklastere> (дата обращения: 09.01.2023).
  29. Московский инновационный кластер // Официальный сайт мэра Москвы. URL: <https://www.mos.ru/city/projects/cluster/> (дата обращения: 08.01.2023).
  30. Для начинающих предпринимателей: в столице запускают программу «Академия инноваторов» // Официальный сайт мэра Москвы. URL: <https://www.mos.ru/news/item/98134073/> (дата обращения: 08.01.2023).
  31. Самый цифровой город страны: 30 московских проектов получили престижные премии в 2022 году // Официальный сайт мэра Москвы. URL: <https://www.mos.ru/news/item/118158073/> (дата обращения: 08.01.2023).
  32. План развития Москвы 2030 – умный город будущего // Официальный сайт мэра Москвы. URL: <https://2030.mos.ru/> (дата обращения: 08.01.2023).
  33. Проект Цифровизации городского хозяйства «Умный город» // Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyu-gorod/> (дата обращения: 10.12.2022).
  34. Национальный проект «Жилье и городская среда» // Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyu-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/> (дата обращения: 10.12.2022).
  35. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» // Минстрой России. URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения: 10.12.2022).

### References

1. Danilov-Danil'yan V.I., Piskulova N.A. (eds.). *Ustoychivoe razvitie: novye vyzovy: uchebnyk dlya vuzov = Sustainable development: new challenges : textbook for universities*. Moscow: Aspekt Press, 2015:336. (In Russ.)
2. Chirkunova E.K., Shekhova N.V. Innovative approaches to the implementation of sustainable development goals in the modern Russian economy. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravlenie = Bulletin of Samara University. Economics and management*. 2021;12(2):101–110. (In Russ.)
3. Development and international economic cooperation: environmental problems. Report of the World Commission on Environment and Development. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy = United Nations*. (In Russ.). Available at: <https://www.un.org/ru/ga/pdf/brundtland.pdf> (accessed 25.12.2022).
4. Gamidullaeva L.A., Doszhan R.D. Sustainable innovations: a systematic review of the literature. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;(3):32–45. (In Russ.)
5. The Agenda for Sustainable Development. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy = United Nations*. (In Russ.). Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/> (accessed 24.12.2022).
6. Sustainable Development Goals. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy = United Nations*. (In Russ.). Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (accessed 24.12.2022).
7. Sustainable Development Goals. Goal 11: Ensuring openness, security, resilience and environmental sustainability of cities and human settlements. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy = United Nations*. (In Russ.). Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cities/> (accessed 24.12.2022).
8. Revision of the World Urbanization prospects for 2018. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy. Departament po ekonomicheskim i sotsial'nym voprosam = United Nations. Department of Economic and Social Affairs*. (In Russ.). Available at:

- <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (accessed 24.12.2022).
9. Demographic changes. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy = United Nations*. (In Russ.). Available at: <https://www.un.org/ru/un75/shifting-demographics> (accessed 24.12.2022).
  10. Largest urban agglomerations worldwide in 2022, by population. *Statista.com*. Available at: <https://www.statista.com/statistics/912263/population-of-urban-agglomerations-worldwide/> (accessed 24.12.2022).
  11. Forecast of urban and rural population of the world, 2018. *Demoskop Weekly*. (In Russ.). Available at: <http://www.demoscope.ru/weekly/2018/0775/barom03.php> (accessed 25.12.2022).
  12. Matrizaev B.D. Innovations focused on the sustainable development of "smart cities": key problems and areas of conceptual development. *Vestnik Povolzhskogo instituta upravleniya = Bulletin of the Volga Institute of Management*. 2022;22(5):23–34. (In Russ.)
  13. Akimova O.E., Volkov S.K., Khryseva A.A. The concept of "Smart city": evolution, elements and form of implementation. *Teoreticheskaya ekonomika = Theoretical economics*. 2020;(6):55–63. (In Russ.)
  14. Musa S. *Smart Cities – A Roadmap for Development*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/312106742\\_Smart\\_Cities\\_A\\_Roadmap\\_for\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/312106742_Smart_Cities_A_Roadmap_for_Development) (accessed 15.12.2022).
  15. Isakov D. Top-10 "smart cities" of the world. *MegaTrends*. (In Russ.). Available at: <https://megatrends.su/blog/top-10-umnyh-gorodov-mira/> (accessed 15.12.2022).
  16. Smart city technologies: what influences the choice of citizens? *McKinsey&Company*. (In Russ.). Available at: [https://www.mckinsey.com/ru/~/\\_media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/Smart%20city%20solutions%20What%20drives%20citizen%20adoption%20around%20the%20globe/smartcitizenbook-rus.pdf](https://www.mckinsey.com/ru/~/_media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/Smart%20city%20solutions%20What%20drives%20citizen%20adoption%20around%20the%20globe/smartcitizenbook-rus.pdf) (accessed 15.12.2022).
  17. Indicators of "smart" sustainable cities developed by the UNECE–ITU. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy. Ekonomicheskij i sotsial'nyy sovet = United Nations. Economic and Social Council*. (In Russ.). Available at: [https://unece.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/2015/ECE\\_HBP\\_2015\\_4.ru.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/2015/ECE_HBP_2015_4.ru.pdf) (accessed 15.12.2022).
  18. Cohen B. The 3 Generations Of Smart Cities. *Fast Company*. Available at: <https://www.fastcompany.com/3047795/the-3-generations-of-smart-cities> (accessed 12.12.2022).
  19. *Umnyy dom: obzor rynka intellektual'nykh system = Smart home: an overview of the intelligent systems market*. Moscow: Agentstvo innovatsiy goroda Moskvy, 2019:37. (In Russ.)
  20. Strategy "Smart City – 2030. End-to-end technologies". *Ofitsial'nyy sayt mera Moskvy = Official website of the Mayor of Moscow*. (In Russ.). Available at: [https://www.mos.ru/upload/alerts/files/2\\_Tehnologii.pdf](https://www.mos.ru/upload/alerts/files/2_Tehnologii.pdf) (accessed 10.12.2022).
  21. Digital Cities Index 2022. *Economist Impact*. Available at: <https://impact.economist.com/projects/digital-cities/2022-executive-summary/> (accessed 10.01.2023).
  22. Rating of the smartest cities in the world. *Informatsionnyy portal NoNews = Information portal NoNews*. (In Russ.). Available at: <https://nonews.co/directory/lists/cities/smart-city-index> (accessed 10.01.2023).
  23. Smart City Index 2021. *International Institute for Management Development*. Available at: [https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/#\\_smartCity](https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/#_smartCity) (accessed 10.01.2023).
  24. The most innovative cities in the world in 2022. *Paymentsense*. Available at: <https://www.paymentsense.com/uk/blog/most-innovative-cities-report-2022/> (accessed 10.01.2023).
  25. Global Startup Ecosystem Index 2021. *StartupBlink*. Available at: <https://www.startupblink.com/blog/global-startup-ecosystem-index/> (accessed 10.01.2023).

26. Moscow has entered the top 7 smartest cities in the world. *Ofitsial'nyy sayt mera Moskvy = Official website of the Mayor of Moscow*. (In Russ.). Available at: <https://www.mos.ru/news/item/93279073/> (accessed 10.01.2023).
27. Valetov A. Innovations in the big city. How Moscow becomes a "smart" metropolis. *Strategiya = Strategy*. (In Russ.). Available at: <https://strategyjournal.ru/innovatsii/innovatsii-v-bolshom-gorode-kak-moskva-stanovitsya-umnym-megapolisom/> (accessed 09.01.2023).
28. About the cluster. *Moskovskiy innovatsionnyy klister = Moscow Innovation Cluster*. (In Russ.). Available at: <https://i.moscow/o-klaster> (accessed 09.01.2023).
29. Moscow Innovation Cluster. *Ofitsial'nyy sayt mera Moskvy = Official website of the Mayor of Moscow*. (In Russ.). Available at: <https://www.mos.ru/city/projects/cluster/> (accessed 08.01.2023).
30. For aspiring entrepreneurs: the Academy of Innovators program is being launched in the capital. *Ofitsial'nyy sayt mera Moskvy = Official website of the Mayor of Moscow*. (In Russ.). Available at: <https://www.mos.ru/news/item/98134073/> (accessed 08.01.2023).
31. The most digital city in the country: 30 Moscow projects received prestigious awards in 2022. *Ofitsial'nyy sayt mera Moskvy = Official website of the Mayor of Moscow*. (In Russ.). Available at: <https://www.mos.ru/news/item/118158073/> (accessed 08.01.2023).
32. Moscow Development Plan 2030 – smart city of the future. *Ofitsial'nyy sayt mera Moskvy = Official website of the Mayor of Moscow*. (In Russ.). Available at: <https://2030.mos.ru/> (accessed 08.01.2023).
33. The project of Digitalization of urban economy "Smart City". *Minstroy Rossii = Ministry of Construction of Russia*. (In Russ.). Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod/> (accessed 10.12.2022).
34. National project "Housing and urban environment". *Minstroy Rossii = Ministry of Construction of Russia*. (In Russ.). Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyy-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/> (accessed 10.12.2022).
35. The program "Digital economy of the Russian Federation". *Minstroy Rossii = Ministry of Construction of Russia*. (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (accessed 10.12.2022).

#### ***Информация об авторах / Information about the authors***

**Елена Викторовна Балахонова**

кандидат экономических наук,  
доцент кафедры маркетинга,  
коммерции и сферы обслуживания,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: m-a-r-t-a2005@yandex.ru

**Elena V. Balakhonova**

Candidate of economical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of marketing, commerce and service sector,  
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 17.11.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 12.12.2022**

**Принята к публикации/Accepted 20.12.2022**

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ И МЕРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

И. А. Сергеева<sup>1</sup>, С. В. Тактарова<sup>2</sup>, А. Ю. Сергеев<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>IrAnSergeeva@yandex.ru, <sup>2</sup>staktarova@yandex.ru, <sup>3</sup>Sergeev-aleks@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В современных условиях прослеживается тесная взаимосвязь между экономической безопасностью государства и отдельных промышленных предприятий. Повышение уровня экономической безопасности промышленных предприятий – одна из ключевых проблем современной российской экономики, совершенствование методики оценки его с целью предоставления возможности наиболее точного – ключ к решению данной проблемы. Цель работы – обосновать необходимость совершенствования методики оценки уровня экономической безопасности отечественных промышленных предприятий для прогнозирования и предупреждения потенциальных внешних и внутренних угроз, а также снижения их негативного воздействия. *Материалы и методы.* Методологический потенциал включает монографический метод, применение которого позволило провести систематизацию зарубежных и отечественных методик оценки угроз экономической безопасности предприятия. Посредством экономико-статистического метода были отобраны экзогенные переменные, имеющие устойчивую корреляционную связь с эндогенной переменной – коэффициентом финансовой устойчивости. С целью построения регрессионной модели использовался метод главных компонент. *Результаты.* Выявлены угрозы экономической безопасности, предупреждение и устранение которых является острой необходимостью развития большей части отечественных промышленных предприятий. Выявлены недостатки в применяемых методиках идентификации уровня безопасности экономической деятельности предприятия. По результатам моделирования была предложена модель идентификации уровня безопасности экономической деятельности, учитывающая специфику отечественных промышленных предприятий. Был обоснован комплекс мер, направленных на реализацию стратегии стабилизации и укрепления. *Выводы.* Исследование основных угроз экономической безопасности государства и проблем функционирования промышленных предприятий обуславливает острую необходимость и практическую значимость разработанной модели идентификации уровня безопасности экономической деятельности промышленных предприятий. Кроме того, выработка более детально отражающей реальную действительность модели оценки угроз экономической безопасности предприятия позволяет предложить адекватную и соответствующую его уровню систему как превентивных, так и реактивных мер, способствующих в прогнозном периоде системному решению широкого круга задач.

**Ключевые слова:** экономическая безопасность, методика оценки, совершенствование, уровень экономической безопасности, система мероприятий

**Для цитирования:** Сергеева И. А., Тактарова С. В., Сергеев А. Ю. Методика оценки уровня и меры обеспечения экономической безопасности предприятия // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 56–69. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-3

© Сергеева И. А., Тактарова С. В., Сергеев А. Ю., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE LEVEL AND MEASURES TO ENSURE THE ECONOMIC SECURITY OF THE ENTERPRISE

I.A. Sergeeva<sup>1</sup>, S.V. Taktarova<sup>2</sup>, A.Yu. Sergeev<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>IrAnSergeeva@yandex.ru, <sup>2</sup>staktarova@yandex.ru, <sup>3</sup>Sergeev-aleks@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* In modern conditions, there is a close relationship between the economic security of the state and individual industrial enterprises. Increasing the level of economic security of industrial enterprises is one of the key problems of the modern Russian economy, improving the methodology for assessing it in order to provide the most accurate possible is the key to solving this problem. The purpose of the work is to substantiate the need to improve the methodology for assessing the level of economic security of domestic industrial enterprises in order to predict and prevent potential external and internal threats, as well as reduce their negative impact. *Materials and methods.* The methodological potential includes a monographic method, the use of which made it possible to systematize foreign and domestic methods for assessing threats to the economic security of an enterprise. By means of the economic-statistical method, exogenous variables were selected that have a stable correlation with the endogenous variable – the coefficient of financial stability. In order to build a regression model, the principal component method was used. *Results.* Revealed threats to economic security, the prevention and elimination of which is an urgent need for the development of most of the domestic industrial enterprises. Shortcomings in the applied methods of identification of the level of security of economic activity of the enterprise are revealed. Based on the results of the simulation, a model was proposed for identifying the level of security of economic activity, taking into account the specifics of domestic industrial enterprises. Set of measures aimed at implementing the strategy of stabilization and strengthening was justified. *Conclusions.* The study of the main threats to the economic security of the state and the problems of the functioning of industrial enterprises determines the urgent need and practical significance of the developed model for identifying the level of security of economic activity of industrial enterprises. In addition, the development of a more detailed model reflecting the reality of the assessment of threats to the economic security of the enterprise allows us to propose an adequate and appropriate system of both preventive and reactive measures that contribute to the systematic solution of a wide range of tasks in the forecast period.

**Keywords:** economic security, assessment methodology, improvement, level of economic security, system of measures

**For citation:** Sergeeva I.A., Taktarova S.V., Sergeev A.Yu. Methodology for assessing the level and measures to ensure the economic security of the enterprise. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):56–69. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-3

### *Введение*

В условиях глобальных экономических перемен, что происходят в настоящее время, экономическая безопасность государства все больше и больше зависит от экономической безопасности каждого хозяйствующего субъекта. Важным и ключевым моментом является проведение своевременной и точной внутренней оценки экономической безопасности предприятия с целью определения ее уровня. Потребностью быстрого реагирования на стремительно

развивающиеся внешне- и внутриэкономические отношения является совершенствование методики оценки экономической безопасности предприятия и разработки системы мероприятий защиты от потенциальных и реальных угроз.

Значимость обеспечения экономической безопасности предприятий стремительно возрастает в современных геополитических реалиях. Наиболее весомыми проблемами, с которыми сталкиваются отечественные предприятия в условиях всепоглощающих антироссийских санкций, являются следующие:

- ограничительные меры против финансовой системы, в особенности заморозка банковских активов в зарубежных банках, как следствие, изоляция от проведения расчетов в мировых валютах;
- сокращение потоков инвестиций;
- замедление процессов поддержания и формирования новых производственных связей и цепочек поставок;
- технологическая изоляция [1].

Основные угрозы экономической безопасности на общегосударственном уровне также отражены в Указе Президента РФ от 13.05.2017 № 208 «О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года» [2].

Взаимосвязь между экономической безопасностью государства и отдельным предприятием является очень тесной, именно поэтому в условиях внешнеэкономической и политической напряженности, сложного и неоднозначного положения национальной экономики предприятиям необходимо защищаться от возникающих внутри и извне угроз в целях поддержания стабильного уровня своего существования. Посредством формирования системы мероприятий защиты от потенциальных и реальных угроз предприятия могут добиться высокого уровня экономической безопасности [3].

Прослеживается обратно пропорциональная зависимость: чем выше уровень экономической безопасности предприятия, тем более устойчивым по отношению к возникающим угрозам оно является и, соответственно, нуждается в меньшем количестве мероприятий нейтрализации и защиты.

Система мероприятий защиты от потенциальных и реальных угроз должна соответствовать уровню экономической безопасности предприятия, что позволит хозяйствующим субъектам противостоять внутренним и внешним негативным обстоятельствам, а также обеспечивать финансовую стабильность посредством эффективного и целесообразного сосредоточения и расходования ресурсов. Основой защищенности является постоянная оценка угроз экономической безопасности с помощью использования различных методик.

Своевременная и комплексная оценка угроз экономической безопасности хозяйствующего субъекта должна осуществляться на постоянной основе с целью заблаговременной разработки мер по снижению вероятности наступления кризисного состояния. Согласно данным Центра макроэкономического анализа и краткосрочного прогнозирования (ЦМАКП), в 2021 г. отмечен рост количества корпоративных банкротств на 3,4 % по отношению к 2020 г. [4]. Таким образом, проблема оценки угроз экономической безопасности в целом, а также проблемы оперативного обнаружения кризисных тенденций и четкого прогнозирования банкротства в частности являются как никогда актуальными в российских реалиях.

### *Материалы и методы*

Разграничение уровней экономической безопасности предприятия опирается на его финансовое состояние, так как именно оно в большей степени влияет на формирование дальнейшего вектора функционирования и развития предприятия.

Принято идентифицировать четыре основных уровня экономической безопасности предприятия: высокий, средний, низкий и кризисный.

Высокий уровень экономической безопасности свидетельствует о финансовой стабильности и независимости организаций от внешних займов, возможности активно развивать научно-исследовательскую и инвестиционную деятельность [5]. Система мероприятий для предприятий с высоким уровнем экономической безопасности должна основываться на достижении следующей цели – полного перехода предприятия к высокотехнологичному производству.

Предприятия, имеющие средний уровень экономической безопасности, испытывают некоторые финансовые трудности. Однако данные проблемы не носят критический характер. У предприятий могут возникать краткосрочные проблемы с платежеспособностью, также у данного типа предприятий могут возникать трудности с возвратом дебиторской задолженности.

Низкий уровень экономической безопасности предприятий соответствует высокому риску потери финансовой устойчивости. Хозяйствующие субъекты такого типа являются зависимыми от внешних займов. Долгосрочные активы приобретаются по большей степени за счет привлеченных средств, а не собственных. Кроме того, у данных предприятий возникают сложности с оплатой сырья, материалов, комплектующих. Имеются проблемы с обновлением и модернизацией основных производственных фондов [6].

Кризисный уровень экономической безопасности предприятия соответствует потере его финансовой устойчивости и угрозе наступления банкротства. Угроза наступления банкротства хозяйствующего субъекта связана с системой факторов, которые имеют свойство влияния на деятельность предприятия в течение достаточно долгого периода, поэтому необходима регулярная оценка угроз экономической безопасности.

Одним из базовых элементов комплексной оценки финансового положения предприятия является диагностика его платежеспособности, т.е. возможности организации бесперебойно и точно в срок погашать долговые обязательства перед кредиторами, осуществляя при этом свою текущую основную деятельность [7]. Как правило, утрата платежеспособности представляет собой результат влияния комплекса факторов, которые ознаменовали множество финансовых трудностей на предприятии. Выделяют следующие основные причины утраты платежеспособности:

- отсутствие оптимальной структуры баланса активов и пассивов;
- несоответствие (отрицательная динамика) фактических показателей объемов производства и реализации продукции плановым;
- неудовлетворительная динамика величины показателей финансовых результатов;
- рост затрат на производство продукции;
- недостаточный объем собственных оборотных средств, ненадлежащее их использование [8].

Существует множество методик оценки угроз экономической безопасности предприятия. Наиболее точными являются многофакторные модели, включающие систему взаимовлияющих коэффициентов, подобранных посредством мультипликативного дискриминантного анализа.

Значимость зарубежных моделей оценки угроз экономической безопасности заключается в их фундаментальности. Многие из методик, в особенности пятифакторная модель Э. Альтмана, послужили основой для создания новых зарубежных и отечественных моделей. Однако в российских реалиях западные методики имеют довольно ограниченное применение [9], именно поэтому в России больший интерес приобретают собственные модели, учитывающие особенности национальной экономики.

Для исследования методики оценки были выбраны отечественные модели ввиду адаптации к российским реалиям. Среди отечественных ученых-экономистов, имеющих разработки по данной проблематике, можно выделить Р. С. Сайфулина, Г. Г. Кадыкова, А. Ю. Беликова, Г. В. Давыдову, О. П. Зайцеву, Г. В. Савицкую, Я. Д. Вишнякова, А. В. Колосова, В. Л. Шемякина.

Систематизация основных отечественных моделей оценки угроз представлена в табл. 1 [10–14].

Таблица 1

Систематизация основных отечественных моделей

Название модели	Оценка модели	Особенности
1	2	3
Рейтинговая модель Р. С. Сайфулина и Г. Г. Кадыкова	Если $R = 1$ – удовлетворительное финансовое состояние. Если $R < 1$ – неудовлетворительное состояние	В модель включен коэффициент менеджмента
Модель А. Ю. Беликова и Г. В. Давыдовой	Если $Z < 0$ – риск банкротства максимальный (90–100 %). Если $0 < Z < 0,18$ – риск банкротства высокий (60–80 %). Если $0,18 < Z < 0,32$ – риск банкротства средний (35–50 %). Если $0,32 < Z < 0,42$ – риск банкротства низкий (15–20 %). Если $Z > 0,42$ – риск банкротства минимальный (до 10 %)	Данная модель специализируется на организациях в сфере торговли
Модель прогнозирования вероятности банкротства О. П. Зайцевой	Для определения вероятности банкротства предприятия необходимо произвести сравнение фактического значения интегрального показателя с нормативным. Нормативное значение $K_{\text{норматив}}$ рассчитывается по следующей формуле: $K_{\text{норматив}} = 1,57 + 0,1K_{\text{б прошлого года}}$ Если $K_{\text{факт}} > K_{\text{норматив}}$ , то высока вероятность банкротства предприятия. Если наоборот, то риск банкротства незначительный	Модель разрабатывалась на основе анализа финансовой динамики производственных предприятий и лучше всего проходит для анализа компаний данного профиля

Окончание табл. 1

1	2	3
Модель прогнозирования вероятности банкротства Г. В. Савицкой	Если $Z > 8$ – риск банкротства отсутствует. Если $5 < Z < 8$ – риск банкротства небольшой. Если $3 < Z < 5$ – риск банкротства средний. Если $1 < Z < 3$ – риск банкротства большой. Если $Z < 1$ – риск банкротства максимальный	Для построения модели исследовались более 200 производственных предприятий в течение 3 лет
Штифакторная модель прогнозирования риска потери платежеспособности Я. Д. Вишнякова, А. В. Колосова, В. Л. Шемякина	Если $Z$ находится в пределах от 10 до 50, вероятность банкротства высокая	Данная модель разработана для предприятий цветной промышленности (предпринимательские структуры типа холдинг)

Достоинство модели Р. С. Сайфулина и Г. Г. Кадыкова заключается в использовании коэффициента менеджмента, недостаток – отсутствие отраслевой специфики. Расчет показателей рейтинговой модели Р. С. Сайфулина и Г. Г. Кадыкова показал, что интегральный показатель меньше единицы, а следовательно, анализируемое предприятие имеет неудовлетворительное финансовое состояние. В рейтинговой модели Р. С. Сайфулина и Г. Г. Кадыкова максимальный вес имеет коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами.

К достоинствам модели А. Ю. Беликова и Г. В. Давыдовой можно отнести возможность определения процентной вероятности банкротства, а также четкое описание разработки и основных этапов расчетов, а недостаток модели – несоответствие результатов расчетов другим моделям и методикам. Расчет показателей модели А. Ю. Беликова и Г. В. Давыдовой показал, что в течение исследуемого периода значение интегрального показателя больше 0,42, а значит, имеется минимальный риск банкротства (до 10 %). По итогам расчета также прослеживается тенденция к снижению интегрального показателя. Однако значение данного показателя сильно превышает его нормативное значение. Это связано с тем, что вес коэффициента обеспеченности собственными оборотными активами равен 8,38. Остальные коэффициенты, используемые в модели, почти не имеют никакого влияния на конечный результат. Особенностью исследуемой модели является ее ориентированность на сферу торговли.

Достоинство модели О. П. Зайцевой – наличие четко определенных нормативных значений, недостатком является недостаточное описание модели. Расчет показателей модели прогнозирования вероятности банкротства О. П. Зайцевой показал, что фактическое значение показателя имеет тенденцию к снижению, в то время как нормативное значение показателя растет. Это свидетельствует о том, что разница между фактическим и нормативным

значением показателя становится больше, что, несомненно, носит положительный характер динамики. Однако исследуемая модель не учитывает отраслевую специфику деятельности предприятия.

В модели Г. В. Савицкой явным недостатком является большой вес коэффициента  $K_1$  (13,23), который искажает интегральное значение. К достоинствам можно отнести расширенную систему оценки степени риска. Расчет показателей модели Г. В. Савицкой показал, что значение интегрального показателя больше 8, следовательно, риск банкротства отсутствует. Значение интегрального показателя имеет тенденцию к снижению. Максимальный вес модели прогнозирования вероятности банкротства Г. В. Савицкой имеет коэффициент отношения оборотного капитала к основному и равен 13,23. Весовое значение коэффициента отношения оборотного капитала к основному абсолютно затмевает собой значения остальных показателей модели. Данная модель не совсем точно характеризует специфику предприятий промышленного комплекса.

Достоинства шестифакторной модели Я. Д. Вишнякова, А. В. Колосова, В. Л. Шемякина: введен фактор капитализации, учитывается качество менеджмента. Расчет показателей шестифакторной модели прогнозирования риска потери платежеспособности Я. Д. Вишнякова, А. В. Колосова, В. Л. Шемякина показал, что значение интегрального показателя находится в пределах от 10 до 50, следовательно, вероятность банкротства высокая. На протяжении исследуемого периода прослеживается тенденция к росту значения интегрального показателя. Максимальный вес имеет коэффициент текущей ликвидности. Несмотря на достаточно большой вес коэффициента текущей ликвидности, в шестифакторной модели прогнозирования риска потери платежеспособности весовые значения остальных коэффициентов также имеют значение для конечного результата.

Вышеуказанные модели адаптированы к современным российским условиям, в которых отечественные предприятия могут вести свою производственную деятельность. Существенными достоинствами данных моделей однозначно являются довольно простая интерпретация показателей, а также относительная простота оценки финансового состояния предприятия. Тем не менее существует проблема невозможности регулярной корректировки исчисления весовых коэффициентов в связи с отсутствием статистической базы. К сожалению, определение данных коэффициентов экспертным путем не обеспечивает их необходимой точности.

Наиболее эффективной прогностической способностью обладают методы, основанные на статистическом анализе данных. К достоинствам данных моделей относят: отсутствие однозначных требований к выборке исходных данных, оценку различных аспектов деятельности организации, количественное определение вероятности событий, простоту вычислений, возможность учета внешних факторов.

Сводная оценка вероятности банкротства представлена на рис. 1.

Таким образом, по итогам исследования пяти моделей оценки угроз экономической безопасности предприятия не удалось дать однозначную оценку. Это связано с тем, что каждая модель имеет собственный набор показателей, а также весовые значения данных коэффициентов. Однако можно выделить

наиболее часто употребляемые показатели. В их число входят: коэффициент текущей ликвидности, коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами, коэффициент рентабельности собственного капитала. Использование в моделях указанных коэффициентов обусловлено тем, что для данных показателей установлены нормативные значения, что облегчает процесс формирования классов финансового состояния.

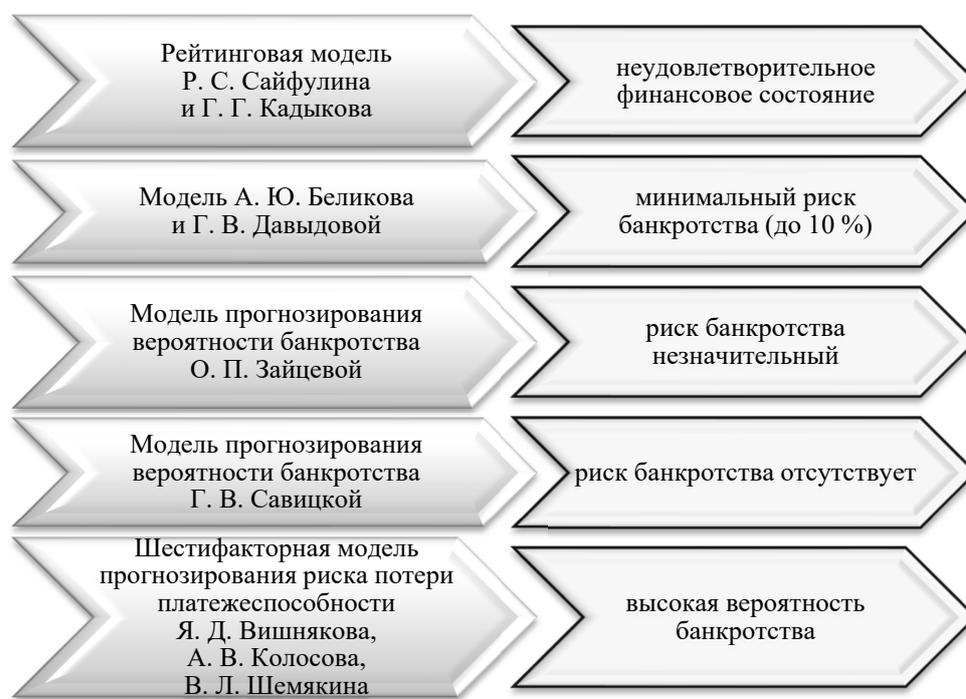


Рис. 1. Сводная оценка вероятности банкротства

Выявленные недостатки включают:

- определение слишком большого весового значения одного из показателей модели, что исключает возможность влияния остальных коэффициентов на итоговое значение интегрального показателя;
- мониторинг весовых коэффициентов;
- не учитывается отраслевая специфика деятельности предприятия.

На основе используемых в представленных методиках коэффициентов посредством экономико-математического регрессионного анализа предлагается рассмотреть вариант совершенствования методики его оценки уровня экономической безопасности промышленных предприятий.

Перечень экзогенных переменных представлен в табл. 2.

В качестве эндогенной (зависимой) переменной был выбран коэффициент финансовой устойчивости ( $R$ ), определяющий степень зависимости предприятия от внешнего финансирования и, соответственно, являющийся одним из основных показателей в определении для предприятия уровня его экономической безопасности. Для дальнейшего исследования сформирована выборка исходных данных, представляющих собой матрицу показателей (размер  $20 \times 80$ ).

Перечень экзогенных переменных

Наименование коэффициента	Обозначение в модели
Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами	$K_{\text{ОСОС}}$
Коэффициент текущей ликвидности	$K_{\text{ТЛ}}$
Коэффициент (маржа) чистой прибыли	$K_{\text{ЧП}}$
Коэффициент рентабельности собственных оборотных активов	$K_{\text{РСОА}}$
Коэффициент оборачиваемости активов	$K_{\text{ОА}}$
Коэффициент рентабельности продукции по чистой прибыли	$K_{\text{РПЧП}}$
Коэффициент убыточности предприятия	$K_{\text{УП}}$
Коэффициент соотношения кредиторской и дебиторской задолженностей	$K_{\text{СКДЗ}}$
Коэффициент соотношения краткосрочных обязательств и оборотных активов	$K_{\text{СКОА}}$
Коэффициент рентабельности продукции по прибыли от продаж	$K_{\text{РПП}}$
Коэффициент финансового рычага	$K_{\text{ФР}}$
Коэффициент загрузки активов	$K_{\text{З}}$
Коэффициент участия собственного капитала в формировании оборотных активов	$K_{\text{УСКФОА}}$
Коэффициент соотношения оборотного и основного капитала	$K_{\text{СООК}}$
Коэффициент оборачиваемости совокупного капитала	$K_{\text{ОСК}}$
Коэффициент финансовой независимости	$K_{\text{ФН}}$
Коэффициент рентабельности совокупного капитала	$K_{\text{РСК}}$
Коэффициент капиталоемкости	$K_{\text{К}}$
Коэффициент общей платежеспособности	$K_{\text{ОП}}$
Коэффициент менеджмента	$K_{\text{М}}$

Все расчеты произведены в прикладном программном пакете для эконометрического моделирования Gretl.

При построении модели было использовано следующее правило: факторы должны быть достоверно связаны с зависимой переменной и не связаны друг с другом. Это позволит избежать эффекта мультиколлинеарности при построении модели. Посредством экономико-статистического метода были отобраны экзогенные переменные, имеющие устойчивую корреляционную связь с эндогенной переменной – коэффициентом финансовой устойчивости. За невозможностью применения метода наименьших квадратов с целью построения регрессионной модели за счет большой выборки данных использовался метод главных компонент.

В соответствии с тепловой матрицей корреляционных плеяд видно, что в представленном наборе данных присутствуют факторы, имеющие достоверную корреляционную связь с другими. Данный вывод также подтверждается путем сравнения расчетных значений коэффициента парной корреляции с критическим, значение которого равно 0,2199. Таким образом, статистически значимой связью с эндогенной переменной обладают коэффициенты  $K_{\text{ОСОС}}$ ,  $K_{\text{ТЛ}}$ ,  $K_{\text{ОА}}$ ,  $K_{\text{РПЧП}}$ ,  $K_{\text{УП}}$ ,  $K_{\text{СКДЗ}}$ ,  $K_{\text{СКОА}}$ ,  $K_{\text{З}}$ ,  $K_{\text{СООК}}$ ,  $K_{\text{ФН}}$ ,  $K_{\text{М}}$ .

Большой объем выборки не позволяет нам построить регрессионную модель с использованием обычного метода наименьших квадратов, поэтому

в целях построения модели оценки уровня экономической безопасности был выбран метод главных компонент.

Произведена предварительная  $z$ -стандартизация переменных с помощью использования скаляров средних значений и скаляров стандартного отклонения для всех независимых переменных.

### *Результаты и обсуждение*

Результаты построения главных компонент с помощью стандартизованных  $z$ -переменных показали, что только четыре компоненты имеют собственное значение больше единицы. Совокупная доля их влияния на финансовую устойчивость составляет 72,42 %. Самая высокая факторная нагрузка наблюдается по первой компоненте. Целесообразно строить модель оценки уровня экономической безопасности от первой компоненты РС1.

Результаты построения модели по главной компоненте свидетельствуют о том, что модель характеризуется достаточно высоким качеством объяснения: значение коэффициенты детерминации равно 0,699. Статистическая значимость подтверждается соответствующим  $p$ -значением ( $F$ ) =  $5,16e^{-22} < 0,05$ . Коэффициенты полученной модели также статистически значимы:  $p$ -значение для константы равно  $4,45e^{-30}$  и  $p$ -значение перед переменной РС1 равно  $5,16e^{-22}$ , что меньше заданного уровня значимости.

По результатам моделирования была получена следующая модель оценки уровня экономической безопасности промышленных предприятий:

$$R = 0,216 + 0,275 K_{\text{ОСОС}} - 0,471 K_{\text{ТЛ}} - 0,551 K_{\text{ОА}} + 0,269 K_{\text{РПЧП}} + \\ + 0,207 K_{\text{УП}} + 0,318 K_{\text{СКДЗ}} - 0,501 K_{\text{СКООА}} - 0,418 K_{\text{КЗ}} - \\ - 0,381 K_{\text{СООК}} - 0,228 K_{\text{ФН}} - 0,547 K_{\text{М}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{ОСОС}}$  – коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами;  $K_{\text{ТЛ}}$  – коэффициент текущей ликвидности;  $K_{\text{ОА}}$  – коэффициент оборачиваемости активов;  $K_{\text{РПЧП}}$  – коэффициент рентабельности продукции по чистой прибыли;  $K_{\text{УП}}$  – коэффициент убыточности предприятия;  $K_{\text{СКДЗ}}$  – коэффициент соотношения кредиторской и дебиторской задолженностей;  $K_{\text{СКООА}}$  – коэффициент соотношения краткосрочных обязательств и оборотных активов;  $K_{\text{КЗ}}$  – коэффициент загрузки активов;  $K_{\text{СООК}}$  – коэффициент соотношения оборотного и основного капитала;  $K_{\text{ФН}}$  – коэффициент финансовой независимости;  $K_{\text{М}}$  – коэффициент менеджмента.

По сформированной модели были произведены расчеты и на основе полученных по промежуточным расчетам значения показателей модели определен интегральный показатель. Предполагается использовать модульное значение интегрального показателя модели. По разработанной модели было определено нормативное значение  $|R| > 2,22$ . Фактическое значение интегрального показателя модели в 2021 г. равно 2,39, что выше установленного норматива, следовательно, данное предприятие имеет удовлетворительное финансовое состояние. Однако не все входящие в разработанную модель коэффициенты соответствуют нормативным значениям.

Необходимо сформировать систему мероприятий, повышающих значения всех коэффициентов модели.

В связи с выявленным в исследовании нормативным значением модели оценки, дифференцирующим финансовое состояние предприятия на удовлетворительное и неудовлетворительное, предлагаются комплекс мер-стратегий обеспечения экономической безопасности для каждого из состояний.

В целях разработки системы мероприятий по повышению выявленного уровня была выбрана стратегия стабилизации и укрепления. Комплекс мероприятий направлен в большей степени на развитие инновационно-технологического потенциала предприятий, экономию затрат.

Комплекс краткосрочных мероприятий в рамках стратегии стабилизации и укрепления направлен на оптимизацию денежных потоков предприятия. В целях реструктуризации дебиторской задолженности предлагается внедрение альтернативы факторинга – ABL-финансирование. Внедряемый механизм позволит обеспечить выгодные условия финансирования торгового оборота в рамках дебиторской задолженности, не входящей в общекорпоративные активы. Если в прогнозируемом периоде (ближайшие три года) предприятие заключит договор с ABL-компанией, то сможет высвободить и направить денежные средства на погашение краткосрочной кредиторской задолженности.

Долгосрочные меры стратегии стабилизации и укрепления предприятия включают диверсификацию производства.

Предложенная система мероприятий включает в себя меры и краткосрочного, и долгосрочного характера и нацелена на укрепление позиций и стабильное развитие промышленного предприятия и, как следствие, улучшение ряда показателей, входящих в разработанную модель оценки уровня его экономической безопасности.

### *Заключение*

Расчет показателей модели оценки уровня экономической безопасности промышленных предприятий отражает положительный эффект, так как значение интегрального показателя составляло 2,39, а после предложенных рекомендаций увеличилось до 2,95. Таким образом, предложенные мероприятия позитивно повлияли на значение интегрального показателя – рост на 23,3 %. Значение коэффициента текущей ликвидности увеличилось и почти достигло нормативного значения, в прогнозном году значение данного коэффициента равно 1,93. Зафиксирован рост значения коэффициента оборачиваемости активов. Кроме того, прослеживается рост значения коэффициента финансовой независимости (82,4 %), а также рост значения коэффициента менеджмента (35,1 %). Увеличение значений остальных показателей, входящих в модель, ожидается в последующих периодах посредством увеличения величины выручки и величины чистой прибыли за счет внедрения мероприятий по диверсификации производства.

Предложенные рекомендации приведут к росту показателей финансовой устойчивости, в связи с чем размер ущерба по финансовой составляющей экономической безопасности сократится на 22,8 %. В прогнозном периоде промышленное предприятие может иметь средний уровень экономической безопасности, это означает, что последствия внешних угроз устранимы.

Таким образом, система предложенных мероприятий положительно сказывается в прогнозном значении на основных показателях финансовой устойчивости и стабильности исследуемого предприятия, повышает уровень экономической безопасности, задает тренд стабильного развития как отдельных коэффициентов, так и деятельности всего предприятия в целом. Кроме того, выработка и более детально отражающей реальную действительность модели оценки угроз экономической безопасности позволяет предложить адекватную

и соответствующую ее уровню систему как превентивных, так и реактивных мер, способствующих в прогнозном периоде системному решению широкого круга задач.

### *Список литературы*

1. Тинякова Л. И. Влияния санкций на экономику России // Территория науки. 2017. № 6. С. 39–42.
2. О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года : указ Президента РФ № 208 от 13.05.2017 // Консультант плюс. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 10.01.2023).
3. Сергеева И. А., Володин В. М. Прогнозирование потенциальных угроз – основа превентивных мер финансовой безопасности организации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. 2017. № 1. С. 140–148.
4. О введении моратория на возбуждение дел о банкротстве по заявлению кредиторов в отношении отдельных должников : постановление Правительства Российской Федерации № 428 от 03.04.2020 // Консультант плюс. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 10.01.2023).
5. Ким П. В. Формирование системы обеспечения экономической безопасности предприятия // Вопросы экономики и управления. 2020. № 1. С. 14–16.
6. Савин В. Ю. Индикаторы оценки экономической безопасности как комплексной характеристики защищенности финансово-хозяйственной деятельности организаций – участников ВЭД // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2018. № 2. С. 303–318.
7. Степанян А. В. Стратегии российских компаний в сложных экономических условиях // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 2. С. 26–37.
8. Бакальская Е. В., Голубева С. А., Торосян Д. В. Диагностика угроз экономической безопасности организации // Вестник Екатеринбургского института. Экономические науки. 2021. № 1. С. 13–17.
9. Казаков А. В., Колышкин А. В. Разработка моделей прогнозирования банкротства в современных российских условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2018. № 34. С. 241–266.
10. Сайфулин Р. С. Методика финансового анализа. М. : ИНФРА-М, 2000. 208 с.
11. Давыдова Г. В., Беликов А. Ю. Методика количественной оценки риска банкротства предприятий // Управление риском. 1999. № 3. С. 13–20.
12. Зайцева О. П. Антикризисный менеджмент в российской фирме // Сибирская финансовая школа. 1998. № 11. С. 66–73.
13. Савицкая Г. В. Экономический анализ : учебник. 15-е изд. М. : ИНФРА-М, 2022. 587 с.
14. Вишняков Я. Д., Колосов А. В., Шемякин В. Л. Оценка и анализ финансовых рисков предприятия в условиях враждебной окружающей среды бизнеса // Менеджмент в России и за рубежом. 2000. № 3. С. 15–17.

### *References*

1. Tinyakova L.I. The impact of sanctions on the Russian economy. *Territoriya nauki = The territory of science*. 2017;(6):39–42. (In Russ.)
2. On the Strategy of economic security of the Russian Federation for the period up to 2030 : Decree of the President of the Russian Federation No. 208 of 13.05.2017. *Consultantplus*. (In Russ.). Available at: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (accessed 10.01.2023).
3. Sergeeva I.A., Volodin V.M. Forecasting potential threats – the basis of preventive measures of financial security of the organization. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

- zavedeniy. Povolzhskiy region. Obshchestvennye nauki = *Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Social sciences*. 2017;(1):140–148. (In Russ.)
4. On the introduction of a moratorium on the initiation of bankruptcy proceedings at the request of creditors in respect of individual debtors: Decree of the Government of the Russian Federation No. 428 of 03.04.2020. *Consultantplus*. (In Russ.). Available at: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (accessed 10.01.2023).
  5. Kim P.V. Formation of the system for ensuring the economic security of the enterprise. *Voprosy ekonomiki i upravleniya = Issues of economics and management*. 2020;(1): 14–16. (In Russ.)
  6. Savin V.Yu. Indicators of economic security assessment as a complex characteristic of the security of financial and economic activities of organizations participating in foreign economic activity. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika = Bulletin of Perm University. Series: Economics*. 2018;(2):303–318. (In Russ.)
  7. Stepanyan A.V. Strategies of Russian companies in difficult economic conditions. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment = Strategic decisions and risk management*. 2018;(2):26–37. (In Russ.)
  8. Bakal'skaya E.V., Golubeva S.A., Torosyan D.V. Diagnostics of threats to the economic security of an organization. *Vestnik Ekaterininskogo instituta. Ekonomicheskie nauki = Bulletin of the Catherine Institute. Economic sciences*. 2021;(1):13–17. (In Russ.)
  9. Kazakov A.V., Kolyshkin A.V. Development of bankruptcy forecasting models in modern Russian conditions. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Ekonomika = Bulletin of St. Petersburg University. Economy*. 2018;(34):241–266. (In Russ.)
  10. Sayfulin R.S. *Metodika finansovogo analiza = Methodology of financial analysis*. Moscow: INFRA-M, 2000:208. (In Russ.)
  11. Davydova G.V., Belikov A.Yu. Methodology of quantitative assessment of the risk of bankruptcy of enterprises. *Upravlenie riskom = Risk management*. 1999;(3):13–20. (In Russ.)
  12. Zaytseva O.P. Anti-crisis management in a Russian firm. *Sibirskaya finansovaya shkola = Siberian Financial School*. 1998;(11):66–73. (In Russ.)
  13. Savitskaya G.V. *Ekonomicheskiy analiz: uchebnik. 15-e izd. = Economic analysis : textbook. 15th ed*. Moscow: INFRA-M, 2022:587. (In Russ.)
  14. Vishnyakov Ya.D., Kolosov A.V., Shemyakin V.L. Assessment and analysis of financial risks of an enterprise in a hostile business environment. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom = Management in Russia and abroad*. 2000;(3):15–17. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Ирина Анатольевна Сергеева**

доктор экономических наук, доцент,  
профессор кафедры менеджмента  
и экономической безопасности,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [IrAnSergeeva@yandex.ru](mailto:IrAnSergeeva@yandex.ru)

**Irina A. Sergeeva**

Doctor of economical sciences,  
associate professor, professor  
of the sub-department of management  
and economic security,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Светлана Викторовна Тактарова**

кандидат экономических наук, доцент,  
заведующий кафедрой менеджмента  
и экономической безопасности,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [staktarova@yandex.ru](mailto:staktarova@yandex.ru)

**Svetlana V. Taktarova**

Candidate of economical sciences,  
associate professor,  
head of the sub-department  
of management and economic security,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Алексей Юрьевич Сергеев**

кандидат экономических наук, доцент,  
доцент кафедры менеджмента  
и экономической безопасности,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: Sergeev-aleks@yandex.ru

**Aleksey Yu. Sergeev**

Candidate of economical sciences,  
associate professor, associate professor  
of the sub-department of management  
and economic security,  
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 15.11.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 29.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 04.12.2022**

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РЕСУРСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

**Н. В. Шмелева**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия  
nshmeleva@misis.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность исследования вызвана необходимостью поиска новых подходов и приоритетов промышленной политики, разработки направлений повышения ресурсной и экологической эффективности экономики для обеспечения технологического суверенитета ключевых отраслей экономики и страны в целом. Рассматриваются теоретико-методологические аспекты экосистемного взаимодействия в промышленности, дается развернутая характеристика и сравнительный анализ экономических категорий «промышленная экосистема», «ресурсоэффективность», «эффект декаплинга». *Материалы и методы.* Методической основой исследования являются общенаучные эмпирико-теоретические методы системного анализа, абстрагирования, анализа и синтеза, моделирования. Методология системного анализа выполняет роль каркаса, объединяющего все необходимые методы, исследовательские приемы, мероприятия для решения проблемы повышения ресурсной эффективности промышленных экосистем. Синергетический подход позволяет учитывать динамический аспект развития предприятий и промышленных экосистем. *Результаты.* Предложена комплексная методика, позволяющая оценить ресурсную эффективность как отдельных акторов, так и промышленной экосистемы в целом. Методика апробирована на примере промышленной экосистемы «Зеленый цемент», функционирующей на основе симбиотических связей между горно-металлургическими компаниями и предприятиями цементной отрасли. *Выводы.* Проведенные расчеты позволили сделать вывод о наличии «абсолютного» эффекта декаплинга в анализируемой промышленной экосистеме. Изложенные методические подходы могут быть использованы как отдельно для экспресс-анализа, так и в качестве комплексного инструментария ресурсной эффективности промышленных предприятий и экосистем.

**Ключевые слова:** экосистемное взаимодействие, промышленная экосистема, ресурсная эффективность, эффект декаплинга

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-28-01548 «Интеграция предприятий в инновационные промышленные экосистемы для формирования окон возможностей развития и реализации политики импортонезависимости».

**Для цитирования:** Шмелева Н. В. Методические подходы к оценке ресурсной эффективности промышленных экосистем // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 70–84. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-4

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE RESOURCE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL ECOSYSTEMS

N.V. Shmeleva

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia  
nshmeleva@misis.ru

**Abstract.** *Background.* The importance of the research is caused by the need to search for new approaches and priorities of industrial policy, to develop directions for improving the resource and environmental efficiency of the economy to ensure the technological sovereignty of key sectors of the economy and the country. Theoretical and methodological aspects of ecosystem interaction in industry are considered, a detailed description and comparative analysis of the economic categories "industrial ecosystem", "resource efficiency", "decoupling effect" are given. *Materials and methods.* The methodological basis of the research is the general scientific empirical-theoretical methods of system analysis, abstraction, analysis and synthesis, modeling. The methodology of system analysis serves as a framework that combines all the necessary methods, research techniques, and measures to solve the problem of increasing the resource efficiency of industrial ecosystems. The synergetic approach allows considering the dynamic aspect of the development of enterprises and industrial ecosystems. *Results.* A comprehensive methodology is proposed to assess the resource efficiency of both individual actors and the industrial ecosystem. The methodology is tested on the example of the industrial ecosystem "Green Cement", functioning based on symbiotic relationships between mining and metallurgical companies and enterprises of the cement industry. *Conclusions.* The calculations made it possible to conclude that there is an "absolute" decoupling effect in the analyzed industrial ecosystem. The methodological approaches described in the article can be used both separately for express analysis and as a comprehensive tool for resource efficiency of industrial enterprises and ecosystems.

**Keywords:** ecosystem interaction, industrial ecosystem, resource efficiency, decoupling effect

**Acknowledgments:** the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 23-28-01548 "Integration of enterprises into innovative industrial ecosystems for the formation of windows of opportunity for development and implementation of import-independence policy".

**For citation:** Shmeleva N.V. Methodological approaches to assessing the resource efficiency of industrial ecosystems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):70–84. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-4

### **Введение**

Глобальные вызовы меняют подходы к развитию социально-экономических систем в сторону ресурсоэффективности и декарбонизации за счет сокращения выбросов парниковых газов без ущерба для темпов социально-экономического развития. Современная геополитическая карта с разрывами промышленно-технологических связей привела к необходимости рестарта промышленного обустройства экономического пространства и выстраивания новых технологических цепочек. В соответствии со стратегией пространственного

развития Российской Федерации на период до 2025 года<sup>1</sup> формирование макрорегионов относится к числу ключевых задач развития и достигается за счет использования потенциала межрегиональной интеграции, с эффективной специализацией и кооперацией промышленных предприятий, а также согласования и взаимоувязки приоритетов отраслевого и территориального развития стратегического планирования.

Значительное ускорение и усложнение экономических процессов определили появление сетевых форм взаимодействия между экономическими субъектами, развитие которых привело к трансформации структуры экономики: сети становятся наиболее продуктивными и перспективными формами взаимодействия хозяйствующих субъектов. В основе новой парадигмы лежит трансформация процессов взаимодействия между экономическими агентами и построение коллаборативных связей через реализацию экосистемных моделей.

Понятие «экосистема» в современной науке малоизучено и трактуется неоднозначно. Родоначальником применения метафоры «экосистема» к бизнесу принято считать Дж. Ф. Мура, который предложил исследовать взаимозависимость фирм, а также процесс комплексного взаимодействия между конкурентной и кооперационной стратегиями бизнеса, определив экосистему как «экономическое сообщество, поддерживаемое базисом из взаимодействующих организаций и отдельных лиц» [1]. Промышленные экосистемы впервые стали рассматриваться в контексте промышленной экологии. R. A. Frosch, N. E. Gallopoulos определяют промышленную экосистему как «модель промышленной деятельности, в которой отдельные производственные процессы потребляют сырье и генерируют продукцию, подлежащую продаже, и отходы, подлежащие переработке» [2]. J. Koghonen полагает, что «промышленная экосистема – это модель промышленной деятельности, представляющей собой локализованные социально-экономические формации, обеспечивающие устойчивое развитие посредством рециркуляции входных и выходных ресурсов» [3]. В трактовке Б. Г. Клейнера «промышленные экосистемы – это локализованные социально-экономические формации, обеспечивающие устойчивое развитие посредством циркуляции ресурсов в целевой, экологической, технологической и проектной подсистемах» [4].

Другой подход описан в трудах J. Wareham, P. V. Fox [5]. Авторы определяют промышленные экосистемы как «сложные системы экономических акторов, действующих на основе единой платформы, отличающихся своими видами деятельности и особенностями функционирования, целью которых является создание на базе принципа эмерджентности промышленной продукции и/или услуг».

Промышленные экосистемы – это «совокупность взаимодействующих экономических субъектов, не управляющихся иерархически и адаптирующихся друг к другу на основе профессиональных коммуникационных площадок, созданных промышленным архитектором» (Е. В. Попов и др., 2019) [6]. Дж. Уэрхем определяет промышленные экосистемы как «набор компонентов, созданных владельцем продуктовой платформы, и инноваций, разрабатываемых независимыми акторами вне платформы» [7]. Проскурнин С. Д. считает,

<sup>1</sup> Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года : распоряжение Правительства РФ № 207-р от 13.02.2019 : [ред. от 25.06.2022]

что промышленная экосистема является самоорганизующейся, саморегулирующейся и саморазвивающейся открытой системой, характеризующейся входными потоками идей, стоимости, людей, информации, ресурсов. Но из данного определения не совсем ясна цель самоорганизации акторов [8].

Под промышленной экосистемой автор предлагает понимать подход, объединяющий как промышленные предприятия, так и отдельных участников (финансовые, научные, образовательные и государственные институты) на основе обмена материалами, энергией, ресурсами, знаниями и технологиями, создающей экономические, технологические и экологические преимущества для всех участников экосистемы и общества в целом.

### *Материалы и методы*

В международной практике для оценки ресурсоэффективности используют набор показателей, представленный в дорожной карте «К ресурсосберегающей Европе»<sup>1</sup>. Однако данный подход имеет ряд ограничений: отсутствует оценка уровня загрязнения окружающей среды за пределами границ исследуемой территории; не учитывается ограниченность и экономическая ценность ресурсов, а также качественные изменения [9].

Кроме того, классические методики оценки эффективности не подходят для сетевых интеграционных объединений, так как в большей части являются статическими, а в динамических методах учитывается только фактор времени через систему дисконтирования. Промышленные, инновационные и территориальные экосистемы относятся к типу открытых синергетических систем, в которых происходит постоянная диффузия знаний, технологий и ресурсов. Соответственно, при интеграции возникают сетевые спилловер-эффекты.

Предложенная автором методика оценки промышленных экосистем основана на концепциях общей экономической ценности, альтернативной стоимости (упущенная выгода) и методологии Т. Гилберта (Т. Gilbert) [10]. В основе его теории лежит балансовый метод изучения ресурсной эффективности, обеспечивающий комплексный анализ ресурсных потоков.

Концепция общей экономической ценности (TEV), описанная М. Портером и М. Креймером, учитывает прямые и ассимиляционные функции при оценке ресурсной эффективности [11].

Общие ценности создаются тремя основными способами:

- 1) переосмысление продуктов и рынков;
- 2) повышение эффективности в цепочке создания стоимости;
- 3) развитие интеграционных сетевых форм взаимодействия.

Концепция альтернативной стоимости (упущенная выгода) в экономике природопользования используется при оценке ресурсов через упущенные доходы, которые можно было бы получить от их альтернативного использования. Чем меньше альтернативная стоимость природного ресурса, тем меньше нужно затрат для компенсации экономических потерь от сохранения этого блага.

Авторская методика оценки промышленных экосистем состоит из пяти этапов, в каждом предложены подходы, которые могут быть использованы как отдельно для экспресс-анализа, так и в качестве комплексного инструментария ресурсной эффективности промышленных предприятий и экосистем (рис. 1).

---

<sup>1</sup> Roadmap to a Resource Efficient Europe, 2011, European commission. P. 26.

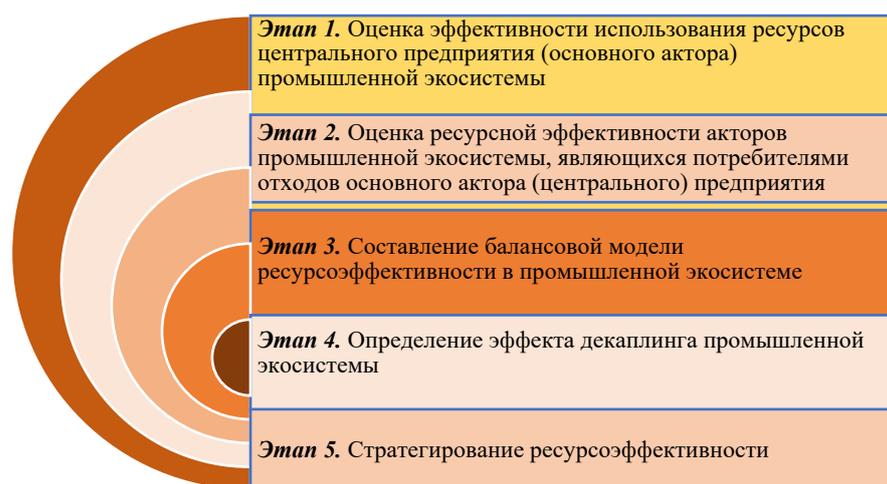


Рис. 1. Методика оценки ресурсной эффективности промышленных экосистем

*Этап 1. Оценка эффективности использования ресурсов центрального предприятия (основного актора) промышленной экосистемы*

Объединение предприятий на основе симбиотических связей для обеспечения циркуляции побочных ресурсов ориентировано на сведение к минимуму потребления первичных ресурсов и количества образующихся отходов. Понимание необходимости повышения ресурсной и экологической эффективности, важности реализации проектов по технологической модернизации, стремление к совместному поиску оптимальных технических решений, а также технологическая возможность одного из партнеров использовать побочные продукты другого, являются стимулами в формировании симбиотического партнерства. В результате возникает экономия на платежах за загрязнение окружающей среды, дополнительные доходы от продажи продукции (отходов), снижается размер эколого-экономического ущерба.

Формула для оценки ресурсной эффективности ( $\Theta_p$ ) основного (центрального) предприятия, являющегося актором промышленной экосистемы, функционирующей на основе симбиотических связей, в результате деятельности которого образуются отходы, являющиеся первичными ресурсами для других предприятий:

$$\Theta_p = \sum_{t=1}^n \frac{V_{отх} + \Delta\Pi_{л} + \Delta Z_{отх} \pm \Delta T_p + A}{(1+d)^t} - \sum_{t=1}^m \frac{I_t}{(1+d)^t}, \quad (1)$$

где  $V_{отх}$  – годовой объем отходов в стоимостном выражении, руб.;  $\Delta\Pi_{л}$  – сокращение платежей за загрязнение окружающей среды, хранение отходов, руб.;  $\Delta Z_{отх}$  – изменение затрат на сбор и утилизацию отходов, руб.;  $\Delta T_p$  – сокращение (увеличение) транспортных расходов, руб.;  $I_t$  – инвестиции в инновационные технологии в период времени  $t$ , руб.;  $A$  – амортизация, руб.;  $d$  – ставка дисконтирования.

Другой подход к оценке ресурсоэффективности промышленных предприятий базируется на сравнительном анализе показателей эффективности использования ресурсов, таких как энергоёмкость, материалоемкость, углеродоемкость.

Индикатор материалоемкости отражает развитие производственных процессов с более высокой добавленной стоимостью, интенсивность потребления сырья и материалов.

Основным критерием энергетической емкости считается численное выражение, которое представляет собой отношение энергии к величине результата эффективности системы (стоимости продукции и услуг).

Углеродоемкость определяется эмиссией парниковых газов, рассчитывается в единицах так называемого CO<sub>2</sub>-эквивалента на единицу произведенной продукции (тонну или, при производстве энергии, гигаджоуль).

*Этап 2. Оценка ресурсной эффективности акторов промышленной экосистемы, являющихся потребителями отходов основного актора (центрального) предприятия*

Стремление промышленных компаний к экосистемной коллаборации отражает степень коллаборативной зрелости предприятий, их активность, согласованность и готовность к сотрудничеству. Эффективность использования энергии, материалов, сырья и прочих ресурсов компаний предлагается оценивать по формуле

$$\Theta_p = \sum_{t=1}^n \frac{O_c + \Delta Z_{\text{отх}} \pm \Delta \text{Tr} + A}{(1+d)^t} - \sum_{t=1}^m \frac{I_t}{(1+d)^t}, \quad (2)$$

где  $O_c$  – годовой объем (количество) отходов, используемых в качестве сырья (вместо первичных ресурсов) в стоимостном выражении, руб.

В результате симбиотического партнерства в промышленных экосистемах возникают спилловер-эффекты («spillover effects», «дополнительные, не учитываемые эффекты»). К положительным спилловер-эффектам можно отнести снижение ущерба, наносимого окружающей среде деятельностью промышленных предприятий, повышение качества жизни людей, проживающих в регионах присутствия и т.д.

*Этап 3. Составление балансовой модели ресурсоэффективности в промышленной экосистеме*

Ресурсоэффективность промышленных предприятий и промышленных экосистем можно оценить с позиции баланса материальных потоков [12–14].

Отходы производства и потребления, образующиеся на промышленных предприятиях, а также отходы, накопленные от прошлой хозяйственной деятельности, подвергаются переработке на специализированных предприятиях и возвращаются в экономику в виде вторичной продукции. Таким образом, создается схема движения потоков отходов, которая может быть описана математическим способом с помощью системы балансовых уравнений.

Балансовое уравнение в схеме материальных потоков имеет вид

$$\sum X_i = \sum Y_i + \sum Z_i, \quad (3)$$

где  $\sum x_i$  – суммарное количество ресурсов, потребляемых предприятием;  $\sum y_i$  – суммарное количество продукции, произведенной предприятием/холдингом;  $\sum z_i$  – суммарное количество отходов, произведенных промышленным предприятием и размещенных в окружающей среде.

При создании замкнутой схемы потоков ресурсов количество произведенных и размещенных в окружающей среде отходов должно стремиться к 0,

т.е. система управления отходами обеспечивает выполнение условия  $\sum Z_i \rightarrow 0$ . Следовательно, в переработку вовлечены образующиеся и накопленные отходы производства и потребления с дальнейшим производством на их основе вторичного сырья и продукции, которые заменяют первичное сырье и другие технологические компоненты. Это возможно в связи с тем, что переработка отходов промышленных предприятий включает прежде всего извлечение содержащихся в них компонентов, которые представляют технологическую ценность, главным образом для этих же промышленных предприятий.

В результате функционирования промышленного предприятия суммарное количество произведенных отходов должно быть равно суммарному количеству произведенных на их основе вторичных ресурсов и готовой продукции:

$$\sum Z_i = \sum X'_i + \sum Y'_i, \quad (4)$$

где  $\sum Y'_i$  и  $\sum X'_i$  – суммарное количество вторичных ресурсов и продукции из них, произведенных предприятиями. Тогда балансовое уравнение материальных потоков промышленной экосистемы примет вид

$$\sum X_i = \sum Y_i + \sum X'_i + \sum Y'_i. \quad (5)$$

Это уравнение соответствует схеме материальных потоков, созданной на основе моделей экономики замкнутого цикла.

#### Этап 4. Определение эффекта декарпинга промышленной экосистемы

Однако ресурсоэффективность лишь показывает, что экономическое развитие опережает рост использования сырья и увеличение выбросов, а не абсолютное снижение нагрузки на окружающую среду. В связи с этим при оценке ресурсной эффективности промышленных экосистем автор предлагает определять эффект декарпинга. Декарпинг (decoupling) – «разъединение, разрыв связей». Данный термин используется для описания ситуаций, когда процессы, имеющие прямую корреляционную связь, начинают развиваться в противоположных направлениях (рис. 2).

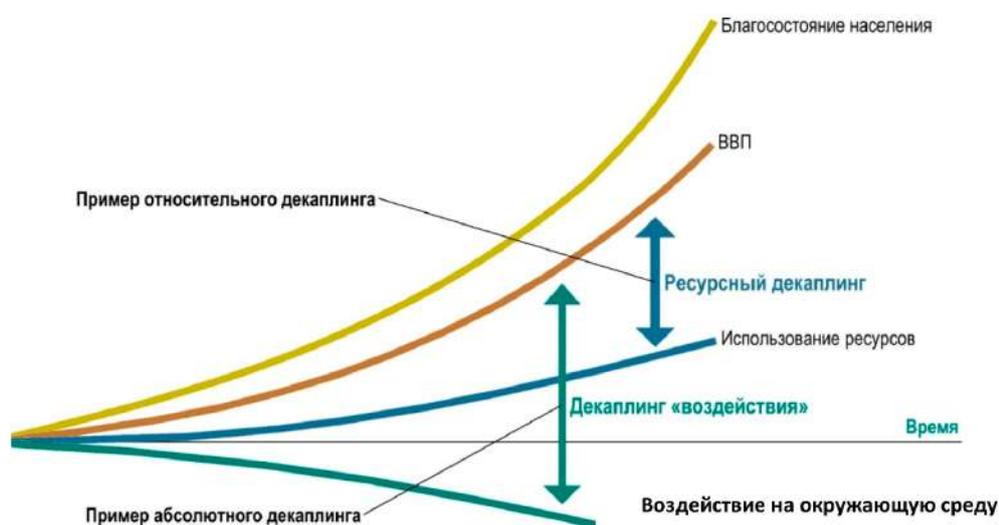


Рис. 2. Эффект декарпинга [15, 16]

Повышение ресурсной эффективности промышленных экосистем в рамках ресурсного декарпинга направлено на решение проблемы истощения природных ресурсов и уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Эффект декарпинга ( $D_I$ ) можно определить через индекс декарпинга по формуле

$$D_I = TR / TY, \quad (6)$$

где  $TR$  – относительное изменение, экономия от снижения потребления ресурсов за определенный период;  $TY$  – относительное изменение, рост доходов или стоимости промышленных предприятий за аналогичный период.

Описание возможных эффектов декарпинга представлено на рис. 3.



Рис. 3. Характеристика эффектов декарпинга  
(составлено автором на основе [17, 19, 20])

Описанная выше методика позволяет не только оценивать экономические последствия нерационального использования ресурсов, но и является основой для разработки стратегии ресурсосбережения на мезоуровне (регионы, территории) и стратегию снижения затрат на микроуровне (промышленные предприятия, симбиозы, экосистемы).

#### *Этап 5. Стратегирование ресурсоэффективности*

Под стратегией ресурсосбережения промышленной экосистемы понимают «систему долгосрочных целей ресурсосберегающей деятельности промышленных акторов, определяемых общими задачами развития экосистемы, а также выбор наиболее эффективных путей их достижения». Ресурсоэффективную стратегию можно представить как генеральное направление (программу, план) ресурсосберегающей деятельности промышленной экосистемы, следование которому в долгосрочной перспективе должно привести к достижению

целей ресурсосбережения и получению ожидаемого экономического, экологического, социального эффектов [18, 21–23]. Инструменты реализации стратегии ресурсоэффективности на мезо- и микроуровнях представлены в табл. 1. Стратегия по направлениям действий и конкретным мероприятиям должна быть согласована с национальными целями и учитывать региональные и отраслевые аспекты, а также стратегические ориентиры промышленных акторов.

Таблица 1

Стратегия ресурсоэффективности промышленных экосистем  
(составлено автором на основе [24–26])

Мезоуровень	Микроуровень
Использование вторичных ресурсов в производственных процессах	Технологические процессы: инновации, модернизация, реконструкция
Стратегия вовлечения ресурсов во вторичный оборот	Отказ от устаревших технологий. Своевременное обновление основных фондов, в том числе за счет внедрения наилучших доступных технологий
Кроссотраслевая коллаборация промышленных субъектов в рамках макрорегионов. Выстраивание региональных цепочек добавленной стоимости. Формирование экспертного сообщества	Интеграция промышленных предприятий и компаний в промышленные симбиозы, экосистемы, кластеры, экоиндустриальные парки и т.д. Формирование симбиотических связей. Создание единой цифровой платформы для эффективного взаимодействия всех заинтересованных участников

Преимуществами объединения предприятий в промышленные экосистемы являются возможность обмена вторичными ресурсами, снижение производственных расходов за счет повышения показателей ресурсной эффективности и уменьшения величины материалоемкости, сокращение издержек на размещение и очистку промышленных отходов, обмен знаниями и инновационными технологиями.

### *Результаты*

Предложенный методический подход по определению эффекта декаплинга апробирован на примере промышленной экосистемы «Зеленый цемент», состоящей из сети промышленных симбиозов.

В качестве интегратора (пейсмейкера) промышленной экосистемы «Зеленый цемент» выступает технология по переработке шлака «Бисквит» (рис. 4) и цифровые сервисы (платформа «AKKERMANN Бетон») компании Akkermann, специально адаптированные для России совместно с компанией Concrete Quality, SLU. Основная цель платформы – способствовать утилизации отходов и побочных продуктов, используя модели экономики замкнутого цикла. Эта цифровая площадка предназначена для сотрудничества поставщиков и пользователей переработанных материалов.

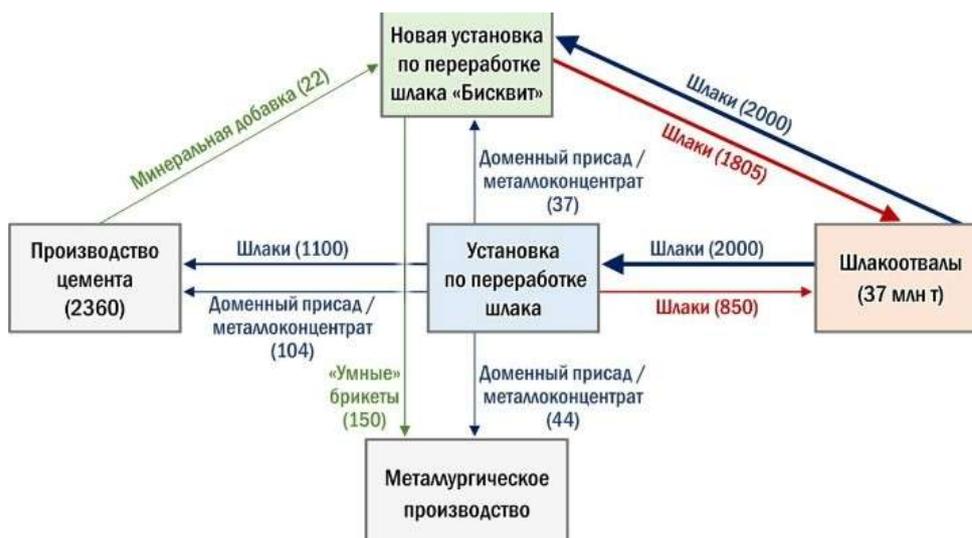


Рис. 4. Технология переработки шлака в промышленной экосистеме «Зеленый цемент» [19]

Бизнес-проект «Бисквит» состоит из четырех инвестиционных проектов – «ШПУ-NEW» и «Линия брикетирования», «ШПУ-NOVA» и «ШПУ-NEO». Проектная мощность по переработке шлака составляет 300 т/ч.

Фактически производство цемента дает возможность использовать в качестве вторичных ресурсов отходы других отраслей промышленности, тем самым значительно удешевляя производство и сокращая воздействие производственной деятельности на окружающую среду.

Основными промышленными акторами экосистемы «Зеленый цемент», которые взаимодействуют на основе симбиотических связей, являются:

- АО «Уральская сталь», г. Новотроицк;
- ООО «АККЕРМАНН ЦЕМЕНТ», г. Новотроицк (до 2020 г. ООО «Южно-уральская Горно-перерабатывающая компания»). Годовой объем производства – 2,3 млн т;
- АККЕРМАНН METAL – производство металлосодержащей продукции, шлакового щебня и вторичных огнеупоров в г. Новотроицке;
- ООО «ГОРНОЗАВОДСКЦЕМЕНТ» (г. Горнозаводск). Годовой объем производства – 2 млн т;
- АККЕРМАНН LIME – производство известняковой муки и минерального порошка в г. Горнозаводске;
- Лаборатория бетонов #PRO\_BETON;
- 11 современных цементных терминалов, расположенных в ПФО и УФО.

Актор «АККЕРМАНН ЦЕМЕНТ» перерабатывает суммарно 6 млн т шлаков – все шлаки, поступающие от АО «Уральская сталь», и 5 млн т шлаков, накопленных в прошлые годы. В цементном производстве используется до 1 млн т переработанного шлака; 0,4 млн т металлоконцентрата возвращается, 4,6 млн т шлакового щебня направляется на открытый склад, откуда отгружается потребителям [19, 20].

В табл. 2 представлены данные для определения эффекта декаплинга промышленной экосистемы «Зеленый цемент», а именно промышленного симбиоза, расположенного в г. Новотроицке.

Таблица 2

Показатели ресурсоэффективности до и после вхождения предприятий в состав промышленной экосистемы

Показатели	Промышленные предприятия	Промышленная экосистема	Экономия, млн руб.
Расход тепловой энергии, млн ГДж	8,97	5,7	962,97
Использование шлака, млн т	0	1	–
Расход первичных ресурсов (известняк, глина, гипс), млн т	3,78	2,2	682,56
Производство цемента, млн т	2,36	2,36	–
Выбросы CO <sub>2</sub> -экв	1,6	0,75	850
Итого:	–	–	2495,53
Прирост прибыли, млн руб.	2654,82		

В промышленной экосистеме потребление известняка и выбросы CO<sub>2</sub>-экв сокращены практически в 2 раза по сравнению с типовым производством, а энергоемкость почти в 1,5 раза ниже, чем на отдельных промышленных предприятиях, не использующих вторичные ресурсы в качестве добавок к сырью. Индекс декаплинга в экосистеме «Зеленый цемент» составил  $D_I = 0,94$ , что означает наличие эффекта «абсолютного» декаплинга.

### **Выводы**

В статье обоснована актуальность интеграции промышленных предприятий в промышленные симбиозы и экосистемы для повышения ресурсной эффективности за счет комплексного использования отходов основного производства и первичных ресурсов. Решение данной задачи требует создания производств не на основе традиционной линейной модели, а через формирование циклических моделей, когда отходы одного производства являются сырьем другого и происходит обмен знаниями и технологиями, что повышает экономическую целесообразность создания замкнутых цепочек производства через повышение ресурсного потенциала и снижения нагрузки на окружающую среду.

Продемонстрированная в статье авторская методика состоит из подходов, которые могут быть использованы как отдельно для экспресс-анализа, так и в качестве комплексного инструментария ресурсной эффективности промышленных предприятий и экосистем.

Кроме того, предложенная методика позволяет оценивать темпы роста выпуска продукции над использованием ресурсов и связанное с ним воздействие на окружающую среду (декаплинг) при анализе функционирования промышленных экосистем.

### **Список литературы**

1. Moore J. F. The death of competition: Leadership and strategy in the age of business ecosystems. New York : Harper Collins, 1997.

2. Frosch R. A., Gallopoulos N. E. Strategies for manufacturing // *Scientific American*. 1989. Vol. 261, № 3. P. 144–153.
3. Korhonen J. Industrial ecosystem: using the material and energy flow model of an ecosystem in an industrial system. University of Jyväskylä, 2000.
4. Клейнер Г. Б. Промышленные экосистемы: взгляд в будущее // *Экономическое возрождение России*. 2018. № 2. С. 53–62.
5. Wareham J., Fox P. B., Cano Giner J. L. Technology ecosystem governance // *Organization science*. 2014. Vol. 25, № 4. P. 1195–1215.
6. Попов Е. В., Симонова В. Л., Тихонова А. Д. Структура промышленных «экосистем» в цифровой экономике // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2019. № 4. С. 3–11.
7. Проскурнин С. Д. Создание самоорганизующейся инновационной экосистемы в зонах особого территориального развития // *Региональная экономика и управление*. 2017. № 4.
8. Шишелов М. А. Оценка ресурсной эффективности использования древесины северного региона: методология и практика (на примере Республики Коми) // *Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета*. 2019. № 2. С. 30–37. doi:10.34130/2070-4992-2019-2-30-37
9. Boyett J. H., Boyett J. T. *Management Guide: Die TopIdeen der Management Gurus*. München : Econ, 1999. 399 S.
10. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L. Evaluation of Circular and Integration Potentials of Innovation Ecosystems for Industrial Sustainability // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. P. 4574. doi:10.3390/su12114574
11. Портер М., Креймер М. Капитализм для всех // *Harvard Business Review*. 2011. С. 39.
12. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L., Shmatko A. An Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 704. doi:10.3390/su14020704
13. Преображенский Б. Г., Толстых Т. О., Шмелева Н. В. Промышленный симбиоз как инструмент циркулярной экономики // *Регион: системы, экономика, управление*. 2020. № 4. С. 37–48
14. 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. doi:10.21685/2227-8486-2020-2-3
15. Скобелев Д. О. Политика повышения ресурсной эффективности для обеспечения устойчивого развития российской промышленности : дис. ... д-ра эконом. наук. Апатиты, 2022.
16. Скобелев Д. О. Возвращение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот: экономика, технология, право // *Компетентность*. 2020. № 4. С. 8–15.
17. Забелина И. А. Эффект декаплинга в эколого-экономическом развитии регионов – участников трансграничного взаимодействия // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2019. Т. 12, № 1. С. 241–255.
18. Квинт В. Л. Концепция стратегирования. Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2020. 170 с. doi:10.21603/978-5-8353-2562-7
19. Потапова Е. Н., Гусева Т. В., Тихонова И. О. [и др.]. Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 15–20.
20. Зеленые кейсы / под ред. Д. О. Скобелева. М. : Деловой экспресс, 2020. 160 с.
21. Афонин С. Е. Систематизация и анализ методов оценки влияния видов экономической деятельности на развитие научно-технического потенциала промышленных

- территориально-отраслевых комплексов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 1. С. 46–54. doi:10.21685/2227-8486-2022-1-5
22. Коркин М. А. Оценка скрытых резервов технологического потенциала промышленных предприятий при внедрении новых технологий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 1. С. 55–62. doi:10.21685/2227-8486-2022-1-6
23. Гамидуллаева Л. А., Досжан Р. Д. Устойчивые инновации: систематический обзор литературы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 3. С. 32–45. doi:10.21685/2227-8486-2020-3-3
24. Шепетовская В. И., Воротников А. М., Фадеева М. Л. Эффективная инновационная деятельность как залог устойчивого развития России // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 16–35. doi:10.21685/2227-8486-2022-2-2
25. Суловицкая Г. В. Потенциал «сквозных» цифровых технологий для совершенствования систем менеджмента качества // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 3. С. 60–70.
26. Великая О. А. Цифровые технологии и инструменты как основа эффективности развития промышленности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 5–15. doi:10.21685/2227-8486-2022-2-1

### References

1. Moore J.F. *The death of competition: Leadership and strategy in the age of business ecosystems*. New York: Harper Collins, 1997.
2. Frosch R.A., Gallopoulos N.E. Strategies for manufacturing. *Scientific American*. 1989;261(3):144–153.
3. Korhonen J. *Industrial ecosystem: using the material and energy flow model of an ecosystem in an industrial system*. University of Jyväskylä, 2000.
4. Kleyner G.B. Industrial ecosystems: a look into the future. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii = The economic revival of Russia*. 2018;(2):53–62. (In Russ.)
5. Wareham J., Fox P.B., Cano Giner J.L. Technology ecosystem governance. *Organization science*. 2014;25(4):1195–1215.
6. Popov E.V., Simonova V.L., Tikhonova A.D. The structure of industrial "ecosystems" in the digital economy. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom = Management in Russia and abroad*. 2019;(4):3–11. (In Russ.)
7. Proskurnin S.D. Creation of a self-organized innovation ecosystem in zones of special territorial development. *Regional'naya ekonomika i upravlenie = Regional economics and management*. 2017;(4). (In Russ.)
8. Shishelov M.A. Assessment of resource efficiency of wood use in the northern region: methodology and practice (on the example of the Komi Republic). *Korporativnoe upravlenie i innovatsionnoe razvitie ekonomiki Severa: Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo tsentra korporativnogo prava, upravleniya i venchurnogo investirovaniya Syktyvkar'skogo gosudarstvennogo universiteta = Corporate governance and innovative development of the economy of the North: Bulletin of the Research Center of Corporate Law, Management and Venture Investment of Syktyvkar State University*. 2019;(2):30–37. (In Russ.). doi:10.34130/2070-4992-2019-2-30-37
9. Boyett J.H., Boyett J.T. *Management Guide: Die TopIdeen der Management Gurus*. München: Econ, 1999:399.
10. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L. Evaluation of Circular and Integration Potentials of Innovation Ecosystems for Industrial Sustainability. *Sustainability*. 2020;12:4574. doi:10.3390/su12114574
11. Porter M., Kreymer M. Capitalism for All. *Harvard Business Review*. 2011:39. (In Russ.)

12. Tolstykh T., Shmeleva N., Gamidullaeva L., Shmatko A. An Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development. *Sustainability*. 2022;14:704. doi:10.3390/su14020704
13. Preobrazhenskiy B.G., Tolstykh T.O., Shmeleva N.V. Industrial symbiosis as a tool of circular economy. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie = Region: systems, economics, management*. 2020;(4):37–48. (In Russ.)
14. Gamidullaeva L.A., Tolstykh T.O., Shmeleva N.V. Methodology of complex assessment of industrial ecosystem potential 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.). doi:10.21685/2227-8486-2020-2-3
15. Skobelev D.O. Policy of increasing resource efficiency to ensure sustainable development of Russian industry. DSc dissertation. Apatity, 2022. (In Russ.)
16. Skobelev D.O. The return of secondary resources to economic turnover: economics, technology, law. *Kompetentnost' = Competence*. 2020;(4):8–15. (In Russ.)
17. Zabelina I.A. Decapling effect in the ecological and economic development of the regions participating in cross-border interaction. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz = Economic and social changes: facts, trends, forecast*. 2019;12(1):241–255. (In Russ.)
18. Kvint V.L. *Kontseptsiya strategirovaniya = The concept of strategizing*. Kemerovo: Kemerovskiy gosudarstvennyy universitet, 2020:170. (In Russ.). doi:10.21603/978-5-8353-2562-7
19. Potapova E.N., Guseva T.V., Tikhonova I.O. et al. Cement production: aspects of increasing resource efficiency and reducing the negative impact on the environment. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*. 2020;(9):15–20. (In Russ.)
20. Skobelev D.O. (ed.). *Zelenye keysy = Green cases*. Moscow: Delovoy ekspres, 2020:160.
21. Afonin S.E. Systematization and analysis of methods for assessing the impact of economic activities on the development of scientific and technical potential of industrial territorial and industrial complexes. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(1):46–54. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-1-5
22. Korkin M.A. Evaluation of hidden reserves of technological potential of industrial enterprises in the introduction of new technologies. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(1):55–62. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-1-6
23. Gamidullaeva L.A., Doszhan R.D. Sustainable innovations: a systematic review of the literature. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;(3):32–45. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2020-3-3
24. Shepetovskaya V.I., Vorotnikov A.M., Fadeeva M.L. Effective innovative activity as a guarantee of sustainable development of Russia. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):16–35. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-2-2
25. Surovitskaya G.V. The potential of "end-to-end" digital technologies for improving quality management systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(3):60–70. (In Russ.)
26. Velikaya O.A. Digital technologies and tools as a basis for the efficiency of industrial development. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):5–15. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-2-1

***Информация об авторах / Information about the authors***

**Надежда Васильевна Шмелева**

кандидат экономических наук, доцент,  
доцент кафедры индустриальной  
стратегии,

Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСИС»

(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 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)

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

**Поступила в редакцию/Received 20.10.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 16.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 22.12.2022**

## ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЕ КОНСТРУКТЫ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО СТРАТЕГИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ

**Е. В. Шкарупета**

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия  
9056591561@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Цифровое стратегирование является мультиперспективной концепцией развития промышленных систем. Наличие методологической путаницы в ключевых понятиях цифровой стратегии, стратегии цифровой трансформации, а также стратегии цифровизации требует уточнения терминологических конструкций концепции цифрового стратегирования промышленных систем. В этих условиях целью исследования является формирование понятийного аппарата мультиперспективной концепции цифрового стратегирования промышленных систем. *Материалы и методы.* При проведении настоящего исследования применялась стандартизированная методология самостоятельного систематического обзора литературы на основе восьмиступенчатого руководства. Основным методом литературного обзора явился наукометрический анализ на основе средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence и метода кластеризации VOSviewer. *Результаты.* Проведен систематический обзор литературы, и выявлены основные терминологические конструкции концепции цифрового стратегирования промышленных систем. Систематизированы существующие подходы к определению понятий цифрового стратегирования. Сформулирован авторский понятийный аппарат цифрового стратегирования. *Выводы.* Ключевым выводом исследования является формирование такого представления о цифровой стратегии, в котором она представлена фундаментальным понятием более высокого «ранга», включающим как стратегию цифровизации, так и стратегию цифровой трансформации. Цифровое развитие основано на цифровом стратегировании, а значит, является наиболее фундаментальным понятием.

**Ключевые слова:** цифровое стратегирование, цифровая стратегия, стратегия цифровой трансформации, стратегия цифровизации, цифровое развитие, промышленная система, терминологический конструкт

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 23-28-01316).

**Для цитирования:** Шкарупета Е. В. Терминологические конструкции концепции цифрового стратегирования промышленных систем // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 85–99. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-5

## TERMINOLOGICAL CONSTRUCTS OF THE CONCEPT OF DIGITAL STRATEGIZING OF INDUSTRIAL SYSTEMS

E.V. Shkarupeta

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia  
9056591561@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Digital strategizing is a multiperspective concept of industrial systems development. The presence of methodological confusion in the key concepts of digital strategy, digital transformation strategy, as well as digitalization strategy requires clarification of terminological constructs of the concept of digital strategizing of industrial systems. In these circumstances, the purpose of this article is to form the conceptual apparatus of the multiperspective concept of digital strategizing of industrial systems. *Materials and methods.* A standardized methodology of independent systematic literature review based on an eight-step guide was used in this study. The main method of literature review was a scientometric analysis based on Elsevier Research Intelligence tools and VOSviewer clustering method. *Results.* Conducted a systematic review of the literature and identified the main terminological constructs of the concept of digital strategy for industrial systems. The existing approaches to the definition of the concepts of digital strategizing are systematized. The author's conceptual apparatus of digital strategizing is formulated. *Conclusions.* The key conclusion of the study is the formation of such a concept of digital strategy, in which it is represented by a fundamental concept of a higher "rank", including both digitalization strategy and digital transformation strategy. Digital development is based on digital strategizing, and therefore is the most fundamental concept.

**Keywords:** digital strategizing, digital strategy, digital transformation strategy, digitalization strategy, digital development, industrial system, terminological construct

**Acknowledgements:** the research was supported financially by the Russian Foundation for Basic Research (Project № 23-28-01316).

**For citation:** Shkarupeta E.V. Terminological constructs of the concept of digital strategizing of industrial systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):85–99. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-5

### Введение

Адекватным ответом отечественных промышленных систем на санкционное давление и новое мироустройство должен стать промышленный переход на основе трансформации мировоззрения, мышления, «новой технологизации», в первую очередь, основанных на цифровых решениях. По прогнозам экспертов, за 10–15 лет в стране возможно сформировать «алмазный фонд» технологий, позволяющий не только построить национальный технологический суверенитет, но и создать технологическое превосходство, что стратегически в долгосрочной перспективе является более ценным. Технологическое превосходство позволит российским промышленным системам не только не утратить существующий уровень конкурентоспособности, но и создать потенциал «гарантированного зарезервированного развития» [1], основанный на импортоопережении, в том числе на международных рынках.

Адаптивность к текущей турбулентности требует новых цифровых технологий, основанных на них цифровых решений и инструментария цифрового

стратегирования промышленных систем. В настоящее время вопросам разработки цифровых стратегий уделяется особое внимание. Стоит отметить, что в трудах Д. М. Журавлева, В. В. Глухова [2], А. С. Корецкого [3], В. А. Ефанова [4], Т. Хесса [5, 6], С. Альбухитана [7] и их соавторов речь идет о стратегировании цифровой трансформации экономических систем. Работы Л. М. Мосоловой [8], И. Е. Рисина, Е. Ф. Сысоевой [9], С. Людвига [10], Дж. Гарсия-Эстебана [11] и соавторов посвящены стратегированию цифровизации различных процессов. Конкретным цифровым инструментам и технологиям стратегирования – цифровым двойникам и искусственному интеллекту – посвящены работы Н. А. Симченко [12, 13], М. С. Ткаченко [14] и соавторов. Непосредственно цифровым стратегированием занимаются А. Р. Калинин [15], Дж. Мортон [16], Х. Руэл [17], В. Л. Квинт [18], А. В. Бабкин [19] и соавторы.

Главным концептуальным недостатком большинства научных публикаций, посвященных разработке цифровых стратегий и цифровому стратегированию, является методологическая путаница в ключевых понятиях, таких как: «цифровая стратегия», «цифровое стратегирование», «стратегия цифровой трансформации», «стратегия цифровизации». Большинство авторов под цифровой стратегией понимают бизнес-стратегию предприятия, основанную на применении цифровых технологий. По сути, такой подход является ограниченным, характеризуя стратегию цифровизации, но не цифровую стратегию. Цифровая стратегия является нечто большим, чем простым внедрением цифровых технологий в деятельность лиц, принимающих решения в промышленной системе.

В этих условиях целью настоящей статьи является формирование понятийного аппарата мультиперспективной концепции цифрового стратегирования промышленных систем. Необходимость достижения цели требует решения следующих задач: провести систематический обзор литературы и выявить основные терминологические конструкты концепции цифрового стратегирования промышленных систем; систематизировать существующие подходы к определению понятий цифрового стратегирования; сформулировать авторский понятийный аппарат цифрового стратегирования.

Объектом настоящего исследования являются промышленные системы, функционирующие в условиях адаптации к все более цифровой среде и использующие преимущества цифровых технологий.

### ***Материалы и методы***

При проведении настоящего исследования применялась стандартизованная методология самостоятельного систематического обзора литературы на основе восьмиступенчатого руководства [20]:

Этап 1. Планирование.

Шаг 1.1. Определение цели и предполагаемых задач обзора.

Шаг 1.2. Составление протокола для обеспечения согласованности в выполнении обзора.

Этап 2. Отбор.

Шаг 2.1. Применение практического отбора исследований для обзора.

Шаг 2.2. Поиск литературы.

Этап 3. Извлечение.

Шаг 3.1. Извлечение качественных и количественных данных.

Шаг 3.2. Качественная и количественная оценка качества.

Этап 4. Исполнение.

Шаг 4.1. Синтез исследований: качественный, количественный, качественно-количественный.

Шаг 4.2. Написание обзора.

Актуальность использованной методологии объясняется тем, что она расширяет базовую методологию, используемую в экономических науках и других областях, путем многочисленных адаптаций методологически разнообразных областей, включающих и синтезирующих как количественные, так и качественные исследования.

Основным методом литературного обзора явился наукометрический анализ на основе средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence и метода кластеризации VOSviewer.

### *Результаты*

В ходе наукометрического анализа базы Scopus по состоянию на 30.09.2022 по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) было найдено 76 документов, распределение количества которых по годам представлено на рис. 1.

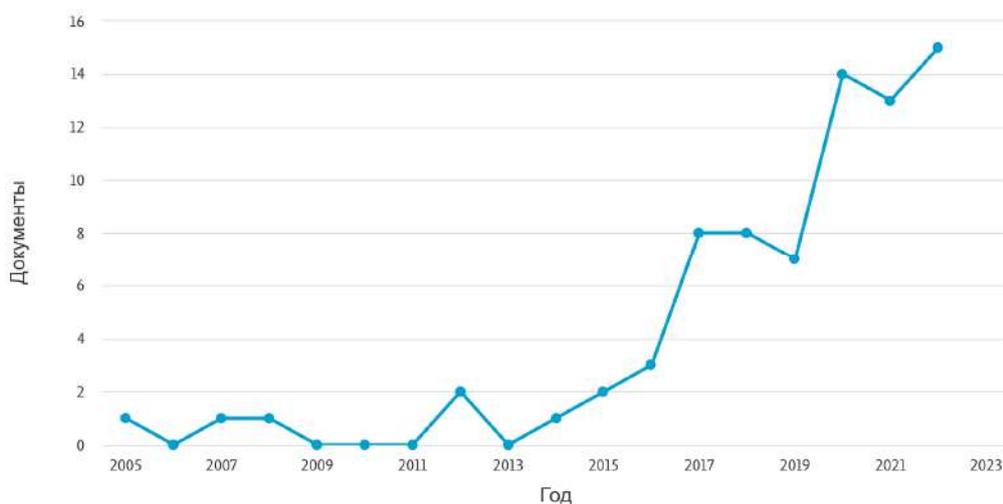


Рис. 1. Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по годам (получено автором с помощью средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence по состоянию на 30.09.2022)

Из рис. 1 видно, что первоначальный интерес к проблематике цифрового стратегирования зародился в 2005 г., после чего наблюдается существенный прирост количества исследований по рассматриваемой теме.

Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по типу и отрасли знаний представлено соответственно на рис. 2, 3.

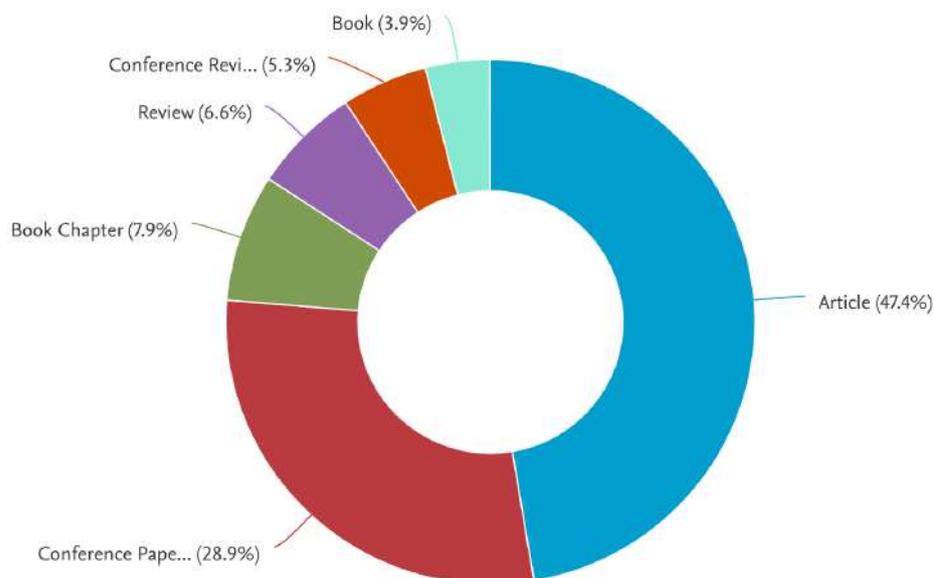


Рис. 2. Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по типу (получено автором с помощью средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence по состоянию на 30.09.2022)

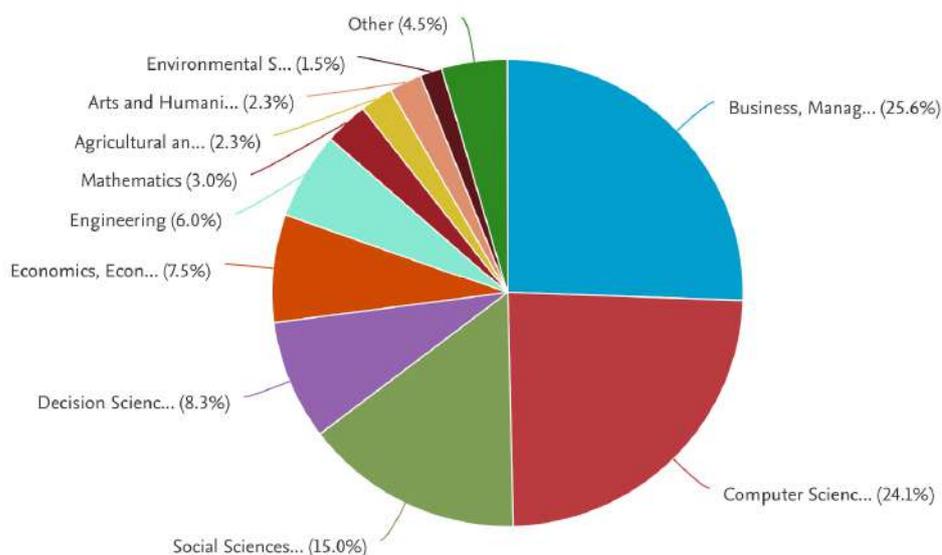


Рис. 3. Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по отрасли знаний (получено автором с помощью средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence по состоянию на 30.09.2022)

Из рис. 2 видно, что из 76 найденных документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) 36 по своему

типу являются статьями, 22 – материалами конференций, 6 – главами в монографиях, 5 – обзорами, 3 – монографиями.

Из рис. 3 следует, что из 76 найденных документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) 32 документа относятся к отрасли знаний компьютерным наукам, 20 – к социальным наукам, 11 – к наукам по принятию решений, 10 – к области экономики, эконометрики и финансов, 8 – к инженерным наукам, 4 – к математическим, 3 – сельскохозяйственным и биологическим наукам и т.д.

Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по странам и организациям представлено соответственно на рис. 4 и 5.

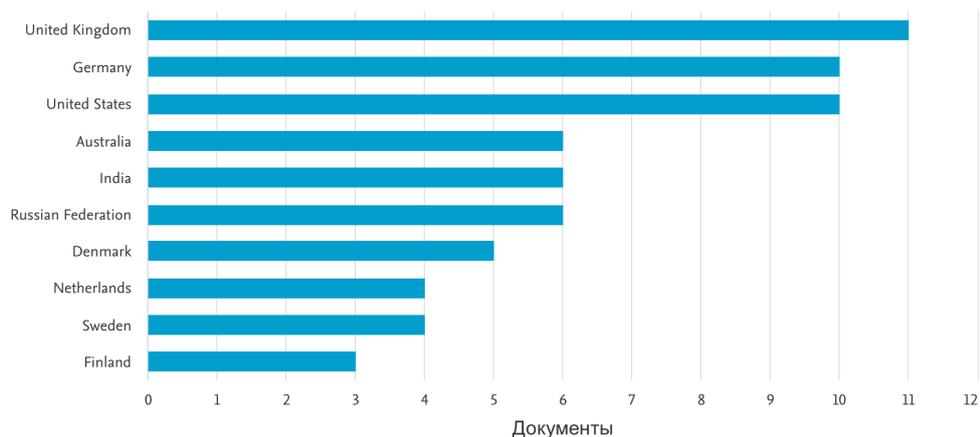


Рис. 4. Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по странам (получено автором с помощью средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence по состоянию на 30.09.2022)

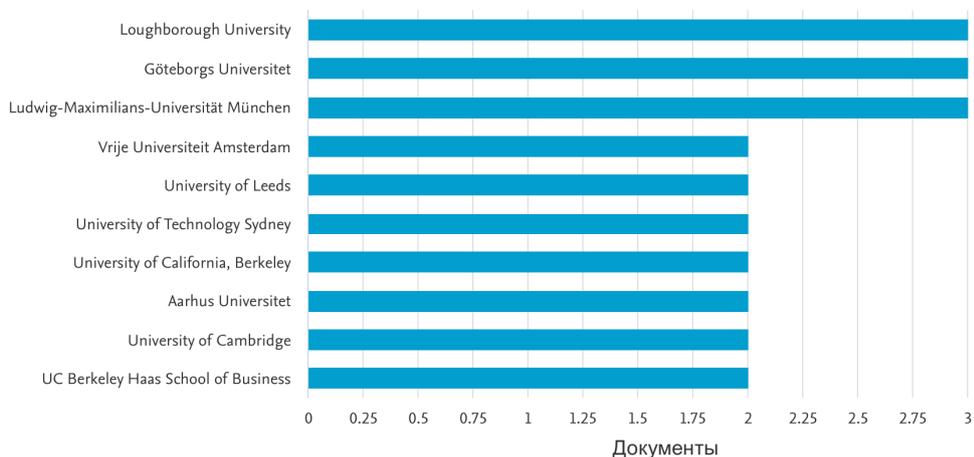


Рис. 5. Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по организациям (получено автором с помощью средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence по состоянию на 30.09.2022)

Из рис. 4 видно, что из 76 найденных документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) 11 относятся к Великобритании, 10 – к Германии, 10 – к США, 6 – к Австралии, 6 – к Индии, 6 – к Российской Федерации, 5 – к Дании, 4 – к Нидерландам, 4 – к Швеции, 3 – к Финляндии и т.д.

Из рис. 5 следует, что из 76 найденных документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) 3 документа относятся к Университету Лафборо, 3 – к Гетеборгскому университету, 3 – к Университету Людвиг-Максимилиана в Мюнхене, 2 – к Университету Амстердама, 2 – к Университету Лидса, 2 – к Сиднейскому технологическому университету, 2 – к Калифорнийскому университету Беркли и т.д.

Ключевые авторы, занимающиеся проблематикой цифрового стратегирования, представлены на рис. 6.



Рис. 6. Распределение 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) по авторам (получено автором с помощью средств исследовательской аналитики Elsevier Research Intelligence по состоянию на 30.09.2022)

Из рис. 6 видно, что из 76 найденных документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) 3 документа принадлежат авторству С. Чаниас [21–23], по 2 документа – Т. Хесс (соавтор С. Чаниас), Дж. Мортони и А. Д. Уилсон [24, 25], по 1 документу – Э. Аалто, С. Абдулла, Т. Абдулла, Дж. Адевопо, С. Адинольф, Ф. Ахлеманн и т.д.

Далее информация, полученная из найденных 76 документов Scopus в части информации о цитировании, библиографической информации, краткого описания и ключевых слов, сведений о финансировании и прочей информации, была загружена в VOSviewer, в результате чего построена карта, основанная на библиографических данных (рис. 7).

Как видно из рис. 7, в результате наукометрического анализа были выделены восемь терминологических конструкторов цифрового стратегирования, разделенные на два кластера:

– в первый кластер вошли понятия цифровизации, цифровой трансформации, цифровых технологий;

– во второй кластер вошли конструкторы стратегирования, информационных систем, использования информации.

Систематизация основных терминологических конструкторов концепции цифрового стратегирования представлена в табл. 1.

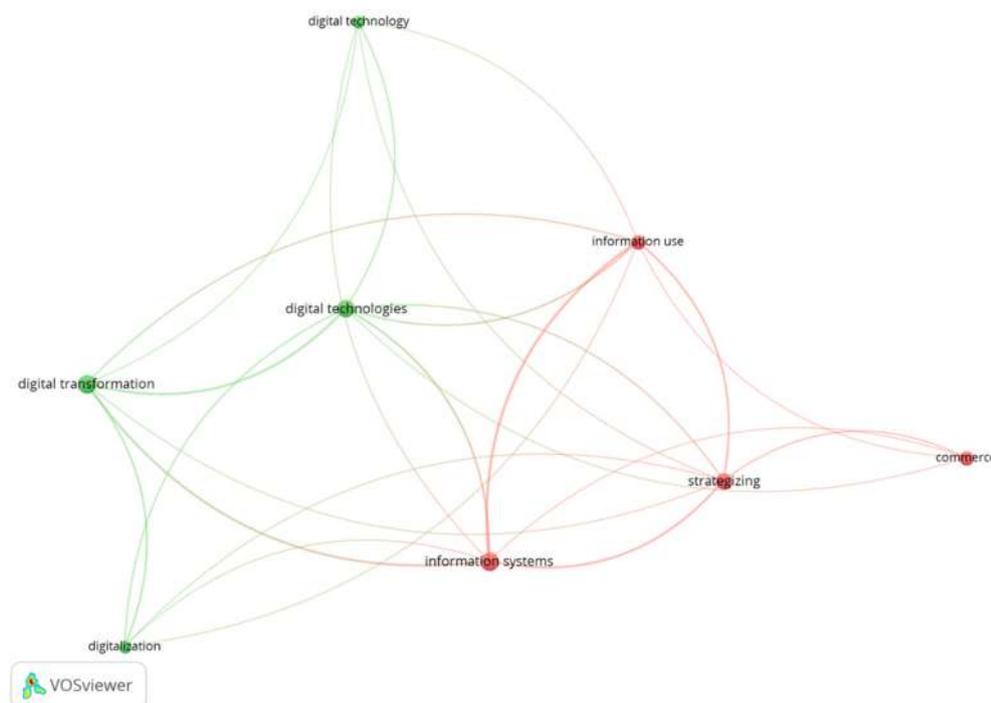


Рис. 7. Карта, основанная на библиографических данных 76 документов Scopus по ключевым словам «цифровое стратегирование» (digital AND strategizing) (получено автором с помощью метода кластеризации VOSviewer)

Таблица 1

Основные терминологические конструкторы концепции цифрового стратегирования промышленных систем (составлено автором)

Конструктор	Терминологическое описание
1	2
Стратегирование информационных систем	Устоявшаяся теоретическая концепция того, как организации участвуют в текущих процессах и практиках разработки стратегии с использованием информационных систем и ИТ [26]
	Осуществление стратегии информационных систем на основе процесса целенаправленной деятельности, такой как развертывание, управление или инвестиции в ИТ, с целью реализации стратегий на основе информационных систем в организациях [27, 28]
Стратегия информационных систем	Организационная перспектива инвестиций в информационные системы, их развертывания, использования и управления ими [29, 30]

1	2
Цифровое стратегирование	Область, сфокусированная на взаимодействии между цифровыми технологиями и людьми на разных уровнях организаций в процессах, которые формируют, передают, реализуют, размещают и поддерживают стратегию [24]
	Обязательно охватывает ряд областей, включая использование информационных систем для стратегии и стратегирования, мобилизацию стратегических информационных систем, а также формулирование и реализацию конкретных (цифровых) стратегий [24]
	Рассматривается как третий (наивысший) уровень цифровой зрелости после ИТ-стратегирования (самое низкое состояние зрелости) и согласованного стратегирования (средний уровень цифровой зрелости) [31]
Цифровая стратегия (по сути, стратегия цифровизации)	Стратегия развития бизнеса с использованием современных цифровых решений [32]
	Стратегия, которая включает в себя объединенный взгляд, в котором приравниваются как цифровые технологии (информационные системы), так и бизнес-стратегия. Другими словами, больше нет четкого различия между бизнес-стратегией и стратегией цифровизации (стратегией информационных систем) [33–35]
	Стратегия, в равной степени ориентированная как на бизнес, так и на технологии [36, 37]
	Организационная стратегия, сформулированная и реализуемая путем использования цифровых ресурсов для создания дифференцированной стоимости [34]
Стратегия цифровой трансформации	Стремится дать представление о том, как может быть разработана и реализована стратегия цифровизации в масштабах организации [5, 6]
Цифровая трансформация	Преобразование/трансформация бизнес-процессов или бизнес-моделей предприятия [38]
Цифровое мышление	Набор установок, убеждений и моделей поведения, которые позволяют людям понимать возможности и риски, связанные с цифровыми технологиями, и применять такие технологии в своей повседневной жизни [39]
Цифровые решения	Решение, которое включает в себя использование цифровых технологий для решения проблемы [39, 40]
Цифровые технологии	Системы, аппаратные средства и процессы, которые используют цифровые данные или сигналы для достижения определенных результатов [39, 41–44]

### Обсуждение

По результатам анализа табл. 1 и с целью устранения когнитивного разрыва, заключающегося в присутствии ограниченного взгляда, синонимизирующего цифровые стратегии и стратегии цифровизации, а также стратегии цифровой трансформации, целесообразно предложить авторские определения цифровой стратегии и цифрового стратегирования промышленных систем.

Под цифровой стратегией промышленных систем автором понимается использование в процессе стратегирования цифровых решений, на основе

цифрового мышления совмещенных с деятельностью лиц, принимающих решения, приводящие к трансформации мировоззрения в новый способ работы, позволяющий промышленным системам внедрять инновации с помощью технологий для создания дифференцированной стоимости и эффективной конкуренции за счет использования новых бизнес-моделей.

В свою очередь, под цифровым стратегированием, на взгляд автора, следует понимать область, сфокусированную на взаимодействии между цифровыми решениями и людьми с цифровым мышлением на разных уровнях промышленных систем в процессах, которые формируют, передают, реализуют, размещают и поддерживают цифровую стратегию.

Представленные определения позволяют терминологически обособить понятия цифровой стратегии от понятий стратегии цифровизации, стратегии цифровой трансформации. Данный подход можно экстраполировать и далее, применив его к понятию цифрового развития. В некоторых существующих нормативных документах, например [45], цифровое развитие приравнено к цифровизации, что, в свою очередь, является некорректной интенцией. Цифровое развитие основано на цифровом стратегировании, а значит, является намного более фундаментальным понятием, чем цифровизация и цифровая трансформация.

### *Заключение*

Ключевым результатом исследования является формирование такого представления о цифровой стратегии, в котором она представлена фундаментальным понятием более высокого «ранга», включающим как стратегию цифровизации, так и стратегию цифровой трансформации. Фундаментальность и высокий ранг цифровой стратегии по сравнению со стратегиями цифровизации и цифровой трансформации обеспечивается за счет формирования цифрового мышления и трансформации мировоззрения участников стратегической деятельности. Такой широкий подход к цифровой стратегии должен быть положен в основу мультиперспективной концепции цифрового стратегирования промышленных систем.

В качестве направлений дальнейших исследований автор рассматривает вопросы оценки импактного воздействия и эффекта от цифрового стратегирования промышленных систем.

### *Список литературы*

1. Боровков А. И., Рождественский О. И., Кукушкин К. В. [и др.]. Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии». Результаты и перспективы // *Инновации*. 2019. № 11. С. 89–104.
2. Журавлев Д. М., Глухов В. В. Стратегирование цифровой трансформации экономических систем как драйвер инновационного развития // *π-Economy*. 2021. Т. 14, № 2. С. 7–21.
3. Корецкий А. С. Стратегирование цифровой трансформации субъектов экономической деятельности на основе бизнес-модели // *Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации* : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 151–155.
4. Ефанов В. А. Стратегирование процессов цифровой трансформации субъектов экономической деятельности // *Актуальные проблемы науки и образования*

- в условиях современных вызовов : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. М., 2021. С. 157–161.
5. Hess T., Matt Ch., Benlian A., Wiesböck F. Options for formulating a digital transformation strategy // *MIS Quarterly Executive*. 2016. Vol. 15, № 2. P. 123–139.
  6. Matt C., Hess T., Benlian A. Digital transformation strategies // *Business & information systems engineering*. 2015. Vol. 57, № 5. С. 339–343.
  7. Albukhitan S. Developing digital transformation strategy for manufacturing // *Procedia computer science*. 2020. Vol. 170. P. 664–671.
  8. Мосолова Л. М. Теоретические основы стратегирования цифровизации транспортной системы // *Теория и практика стратегирования*. 2021. С. 283–289.
  9. Рисин И. Е., Сысоева Е. Ф. Стратегирование процессов цифровизации экономики регионов // *Регион: системы, экономика, управление*. 2020. № 3. С. 39–46.
  10. Ludwig S., Stegmann C. Digitalization Strategy // *The Digital Journey of Banking and Insurance*. 2021. Vol. I. P. 19–33.
  11. García-Esteban J. A., Curto B., Moreno V., Martín I. G. A digitalization strategy for quality control in food industry based on Artificial Intelligence techniques // *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2018. P. 221–226.
  12. Симченко Н. А., Филонов В. И., Цехла С. Ю. Стратегирование развития экономической среды внедрения цифровых двойников в промышленности // *Проблемы современной экономики*. 2021. № 2. С. 31–35.
  13. Симченко Н. А. Стратегирование внедрения цифровых двойников в промышленности // *Интегрированные модели современных информационных систем в условиях цифровизации экономики России*. 2021. С. 286–290.
  14. Ткаченко М. С., Ткаченко С. Н., Ткаченко И. С. Искусственный интеллект: практика применения в стратегировании // *Теория и практика стратегирования*. 2020. С. 88–90.
  15. Калинин А. Р. Цифровое стратегирование горных предприятий // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. 2021. № 3. С. 7–11.
  16. Morton J., Amrollahi A., Wilson A. D. Digital strategizing: An assessing review, definition, and research agenda // *The Journal of Strategic Information Systems*. 2022. P. 101720.
  17. Ruel H., Rowlands H., Njoku E. Digital business strategizing: the role of leadership and organizational learning // *Competitiveness Review: An International Business Journal*. 2020.
  18. Стратегирование цифрового Кузбасса : монография / под ред. В. Л. Квинта. Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2021. 434 с.
  19. Бабкин А. В., Шкарупета Е. В., Гилева Т. А. [и др.]. Методика оценки разрывов цифровой зрелости промышленных предприятий // *Модернизация. Инновации. Развитие*. 2022. Т. 13, № 3. С. 443–458.
  20. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review // *Communications of the Association for Information Systems*. 2015. Vol. 37, № 1. P. 43.
  21. Chantias S., Myers M. D., Hess T. Digital transformation strategy making in pre-digital organizations: The case of a financial services provider // *The Journal of Strategic Information Systems*. 2019. Vol. 28, № 1. P. 17–33.
  22. Chantias S. Mastering digital transformation: the path of a financial services provider towards a digital transformation strategy. 2017.
  23. Chantias S., Hess T. Understanding digital transformation strategy formation: Insights from Europe’s automotive industry. 2016.
  24. Morton J., Amrollahi A., Wilson A. D. Digital strategizing: An assessing review, definition, and research agenda // *The Journal of Strategic Information Systems*. 2022. P. 101720.
  25. Morton J., Wilson A. D., Cooke L. The digital work of strategists: Using open strategy for organizational transformation // *The Journal of Strategic Information Systems*. 2020. Vol. 29, № 2. P. 101613.

26. Marabelli M., Galliers R. D. A reflection on information systems strategizing: the role of power and everyday practices // *Information Systems Journal*. 2017. Vol. 27, № 3. P. 347–366.
27. Henfridsson O., Lind M. Information systems strategizing, organizational sub-communities, and the emergence of a sustainability strategy // *The Journal of Strategic Information Systems*. 2014. Vol. 23, № 1. P. 11–28.
28. Karpovsky A., Hallanoro M., Galliers R. D. Process of Information Systems Strategizing: Review and Synthesis // *Computing Handbook*. 3rd ed. 2014. P. 1–26.
29. Teubner R. A. Information systems strategy // *Business & Information Systems Engineering*. 2013. Vol. 5, № 4. P. 243–257.
30. Chen D. Q., Mocker M., Preston D. S., Teubner A. Information systems strategy: reconceptualization, measurement, and implications // *MIS quarterly*. 2010. P. 233–259.
31. Boström E., Celik O. C. Towards a maturity model for digital strategizing: A qualitative study of how an organization can analyze and assess their digital business strategy. 2017.
32. Кирюшин С. Разработка стратегии цифровой трансформации // О цифровизации и цифровой трансформации : учебник СДТО. 1-е изд. М., 2020.
33. Galliers R. D. Further developments in information systems strategizing: unpacking the concept // *The Oxford Handbook of Information Systems: Critical Perspectives and New Directions*. Oxford : Oxford University Press, 2011. P. 329–345.
34. Bharadwaj A. S., El Sawy O. A., Pavlou P., Venkatraman N. Digital business strategy: toward a next generation of insights // *MIS quarterly*. 2013. P. 471–482.
35. Mithas S., Tafti A., Mitchell W. How a firm's competitive environment and digital strategic posture influence digital business strategy // *MIS quarterly*. 2013. P. 511–536.
36. Sebastian I. M., Moloney K. G., Ross J. W. How big old companies navigate digital transformation // *Strategic information management*. 2020. P. 133–150.
37. Yeow A., Soh C., Hansen R. Aligning with new digital strategy: A dynamic capabilities approach // *The Journal of Strategic Information Systems*. 2018. Vol. 27, № 1. P. 43–58.
38. Гилева Т. А., Бабкин А. В., Гилев Г. А. Разработка стратегии цифровой трансформации предприятия с учетом возможностей бизнес-экосистем // *Экономика и управление*. 2020. Т. 26, № 6. С. 629–642.
39. Цифровая стратегия на 2022–2025 годы. Программа развития ООН.
40. Амелин С. В., Щетинина И. В. Организация производства в условиях цифровой экономики // *Организатор производства*. 2018. Т. 26, № 4. С. 7–18.
41. Туровец О. Г., Родионова В. Н., Каблашова И. В. Обеспечение качества организации производственных процессов в условиях управления цифровым производством // *Организатор производства*. 2018. Т. 26, № 4. С. 65–76.
42. Пантелеева А. П., Петров С. В. Совершенствование экономического анализа и операционной аналитики в процессе внедрения технологий цифровой экономики // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки*. 2022. № 2. С. 200–209.
43. Суловицкая Г. В. Потенциал «сквозных» цифровых технологий для совершенствования систем менеджмента качества // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2021. № 3. С. 60–70. doi:10.21685/2227-8486-2021-3-6
44. Суловицкая Г. В. «Сквозные» цифровые технологии в региональной экономике // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2019. № 4. С. 16–23.
45. Об утверждении Разъяснений (методических рекомендаций) по разработке региональных проектов в рамках федеральных проектов национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : Приказ Минкомсвязи России № 428 от 01.08.2018.

### References

1. Borovkov A.I., Rozhdestvenskiy O.I., Kukushkin K.V. et al. Roadmap for the development of end-to-end digital technology "New production technologies". Results and prospects. *Innovatsii = Innovations*. 2019;(11):89–104. (In Russ.)
2. Zhuravlev D.M., Glukhov V.V. Strategizing digital transformation of economic systems as a driver of innovative development.  *$\pi$ -Economy*. 2021;14(2):7–21. (In Russ.)
3. Koretskiy A.S. Strategizing the digital transformation of economic entities based on a business model. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii: sb. materialov III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern trends in the development of science and the world community in the era of digitalization : collection of materials of the III International scientific and practical conference*. 2021:151–155. (In Russ.)
4. Efanov V.A. Strategizing the processes of digital transformation of economic entities. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya v usloviyakh sovremennykh vyzovov: sb. materialov IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Actual problems of science and education in the conditions of modern challenges : collection of materials of the IV International scientific and practical conference*. Moscow, 2021:157–161. (In Russ.)
5. Hess T., Matt Ch., Benlian A., Wiesböck F. Options for formulating a digital transformation strategy. *MIS Quarterly Executive*. 2016;15(2):123–139.
6. Matt C., Hess T., Benlian A. Digital transformation strategies. *Business & information systems engineering*. 2015;57(5):339–343.
7. Albukhitan S. Developing digital transformation strategy for manufacturing. *Procedia computer science*. 2020;170:664–671.
8. Mosolova L.M. Theoretical foundations of digitalization strategy of the transport system. *Teoriya i praktika strategirovaniya = Theory and practice of strategizing*. 2021:283–289. (In Russ.)
9. Risin I.E., Sysoeva E.F. Strategizing the processes of digitalization of the economy of regions. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie = Region: systems, economics, management*. 2020;(3):39–46. (In Russ.)
10. Ludwig S., Stegmann C. Digitalization Strategy. *The Digital Journey of Banking and Insurance*. 2021;I:19–33.
11. García-Esteban J.A., Curto B., Moreno V., Martín I.G. A digitalization strategy for quality control in food industry based on Artificial Intelligence techniques. *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2018:221–226.
12. Simchenko N.A., Filonov V.I., Tsekhlá S.Yu. Strategizing the development of the economic environment for the introduction of digital twins in industry. *Problemy sovremennoy ekonomiki = Problems of modern economics*. 2021;(2):31–35. (In Russ.)
13. Simchenko N.A. Strategizing the introduction of digital twins in industry. *Integriruyemye modeli sovremennykh informatsionnykh sistem v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki Rossii = Integrated models of modern information systems in the conditions of digitalization of the Russian economy*. 2021:286–290. (In Russ.)
14. Tkachenko M.S., Tkachenko S.N., Tkachenko I.S. Artificial intelligence: practical application in strategizing. *Teoriya i praktika strategirovaniya = Theory and practice of strategizing*. 2020:88–90. (In Russ.)
15. Kalinin A.R. Digital strategizing of mining enterprises. *Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii = Property relations in the Russian Federation*. 2021;(3):7–11. (In Russ.)
16. Morton J., Amrollahi A., Wilson A.D. Digital strategizing: An assessing review, definition, and research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2022:101720.
17. Ruel H., Rowlands H., Njoku E. Digital business strategizing: the role of leadership and organizational learning. *Competitiveness Review: An International Business Journal*. 2020.

18. Kvint V.L. (ed.). *Strategirovanie tsifrovogo Kuzbassa: monografiya = Strategizing the digital Kuzbass : monograph*. Kemerovo: Kemerovskiy gosudarstvennyy universitet, 2021:434. (In Russ.)
19. Babkin A.V., Shkarupeta E.V., Gileva T.A. et al. Methodology for assessing gaps in digital maturity of industrial enterprises. *Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie = Modernization. Innovation. Development*. 2022;13(3):443–458. (In Russ.)
20. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. *Communications of the Association for Information Systems*. 2015;37(1):43.
21. Chanias S., Myers M.D., Hess T. Digital transformation strategy making in pre-digital organizations: The case of a financial services provider. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2019;28(1):17–33.
22. Chanias S. *Mastering digital transformation: the path of a financial services provider towards a digital transformation strategy*. 2017.
23. Chanias S., Hess T. *Understanding digital transformation strategy formation: Insights from Europe's automotive industry*. 2016.
24. Morton J., Amrollahi A., Wilson A.D. Digital strategizing: An assessing review, definition, and research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2022:101720.
25. Morton J., Wilson A.D., Cooke L. The digital work of strategists: Using open strategy for organizational transformation. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2020;29(2):101613.
26. Marabelli M., Galliers R.D. A reflection on information systems strategizing: the role of power and everyday practices. *Information Systems Journal*. 2017;27(3):347–366.
27. Henfridsson O., Lind M. Information systems strategizing, organizational sub-communities, and the emergence of a sustainability strategy. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2014;23(1):11–28.
28. Karpovsky A., Hallanoro M., Galliers R.D. Process of Information Systems Strategizing: Review and Synthesis. *Computing Handbook. 3rd ed*. 2014:1–26.
29. Teubner R.A. Information systems strategy. *Business & Information Systems Engineering*. 2013;5(4):243–257.
30. Chen D.Q., Mocker M., Preston D.S., Teubner A. Information systems strategy: reconceptualization, measurement, and implications. *MIS quarterly*. 2010:233–259.
31. Boström E., Celik O.C. *Towards a maturity model for digital strategizing: A qualitative study of how an organization can analyze and assess their digital business strategy*. 2017.
32. Kiryushin S. Development of a digital transformation strategy. *O tsifrovizatsii i tsifrovoy transformatsii: uchebnik CDTO. 1-e izd. = On digitalization and digital transformation : textbook CDTO. 1st ed*. Moscow, 2020. (In Russ.)
33. Galliers R.D. Further developments in information systems strategizing: unpacking the concept. *The Oxford Handbook of Information Systems: Critical Perspectives and New Directions*. Oxford: Oxford University Press, 2011:329–345.
34. Bharadwaj A.S., El Sawy O.A., Pavlou P., Venkatraman N. Digital business strategy: toward a next generation of insights. *MIS quarterly*. 2013:471–482.
35. Mithas S., Tafti A., Mitchell W. How a firm's competitive environment and digital strategic posture influence digital business strategy. *MIS quarterly*. 2013:511–536.
36. Sebastian I.M., Moloney K.G., Ross J.W. How big old companies navigate digital transformation. *Strategic information management*. 2020:133–150.
37. Yeow A., Soh C., Hansen R. Aligning with new digital strategy: A dynamic capabilities approach. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2018;27(1):43–58.
38. Gileva T.A., Babkin A.V., Gilev G.A. Development of an enterprise digital transformation strategy taking into account the capabilities of business ecosystems. *Ekonomika i upravlenie = Economics and management*. 2020;26(6):629–642. (In Russ.)

39. *Tsifrovaya strategiya na 2022–2025 gody. Programma razvitiya OON = Digital Strategy for 2022–2025. United Nations Development Program.* (In Russ.)
40. Amelin S.V., Shchetinina I.V. Organization of production in the digital economy. *Organizator proizvodstva = Organizer of production.* 2018;26(4):7–18. (In Russ.)
41. Turovets O.G., Rodionova V.N., Kablashova I.V. Quality assurance of the organization of production processes in the conditions of digital production management. *Organizator proizvodstva = Organizer of production.* 2018;26(4):65–76. (In Russ.)
42. Panteleeva A.P., Petrov S.V. Improvement of economic analysis and operational analytics in the process of introducing digital economy technologies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Obshchestvennye nauki = Izvestiya of higher educational institutions. Volga region. Social sciences.* 2022;(2):200–209. (In Russ.)
43. Surovitskaya G.V. The potential of "end-to-end" digital technologies for improving quality management systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2021;(3):60–70. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2021-3-6
44. Surovitskaya G.V. "End-to-end" digital technologies in the regional economy. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2019;(4):16–23. (In Russ.)
45. *Ob utverzhdenii Raz'yasneniy (metodicheskikh rekomendatsiy) po razrabotke regional'nykh proektov v ramkakh federal'nykh proektov natsional'noy programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii»: Prikaz Minkomsvyazi Rossii № 428 ot 01.08.2018 = On approval of Explanations (methodological recommendations) on the development of regional projects within the framework of federal projects of the national program "Digital Economy of the Russian Federation" : Order of the Ministry of Communications of the Russian Federation No. 428 dated 01.08.2018.* (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Елена Витальевна Шкарупета**

доктор экономических наук,  
профессор кафедры цифровой  
и отраслевой экономики,  
Воронежский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Воронеж,  
ул. 20-летия октября, 84)  
E-mail: 9056591561@mail.ru

##### **Elena V. Shkarupeta**

Doctor of economical sciences,  
professor of the sub-department  
of digital and branch economy,  
Voronezh State Technical University  
(84, 20-letiya Oktyabrya street,  
Voronezh, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 05.09.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 18.09.2022**

**Принята к публикации/Accepted 15.10.2022**

## Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

### Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

---

УДК 62-551.3  
doi:10.21685/2227-8486-2023-1-6

#### РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ

**С. В. Фролов<sup>1</sup>, К. С. Савинова<sup>2</sup>,  
Г. П. Ильин<sup>3</sup>, А. Н. Ветров<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия  
<sup>1</sup>sergej.frolov@gmail.com, <sup>2</sup>savinova.k94@mail.ru, <sup>3</sup>gregilyn@mail.ru, <sup>4</sup>avetrov@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В работе рассматривается применение многопозиционного регулирования в медицинской технике. Показано, что многопозиционное регулирование может использоваться в системах стерилизации для обработки медицинских инструментов. *Материалы и методы.* Для исследования процессов многопозиционного регулирования была разработана лабораторная установка на основе контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer. В среде разработки ISaGRAF 3.32 на языке функциональных блок-диаграмм FBD (Function Block Diagram) была создана программа, реализующая четырехпозиционную систему регулирования температуры в камере лабораторной установки. В программной среде Matlab (Simulink) реализован процесс регулирования температуры в камере установки. *Результаты.* В результате рассмотренных методов исследования было доказано, что во время нагрева камеры и действия возмущений работают все три ступени подачи энергии. В период стерилизации, когда необходимо только поддержание заданной температуры и требуется небольшое количество энергии, работает только последняя ступень малой мощности. *Выводы.* Показано преимущество многопозиционных систем регулирования по сравнению с двухпозиционным методом управления.

**Ключевые слова:** двухпозиционное регулирование, многопозиционное регулирование, имитационное моделирование, суховоздушные стерилизаторы, контроллер, ISaGRAF

**Для цитирования:** Фролов С. В., Савинова К. С., Ильин Г. П., Ветров А. Н. Реализация систем позиционного регулирования в медицинской технике // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 100–110. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-6

---

© Фролов С. В., Савинова К. С., Ильин Г. П., Ветров А. Н., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

## THE USE OF EFFECTIVE ON-OFF CONTROL SYSTEMS FOR MEDICAL EQUIPMENT TASKS

S.V. Frolov<sup>1</sup>, K.S. Savinova<sup>2</sup>, G.P. Ilyin<sup>3</sup>, A.N. Vetrov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Tambov State Technical University, Tambov, Russia

<sup>1</sup>sergej.frolov@gmail.com, <sup>2</sup>savinova.k94@mail.ru, <sup>3</sup>gregilyn@mail.ru, <sup>4</sup>avetrov@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The paper considers the use of multi-position regulation in medical technology. It is shown that multi-position regulation is used in sterilization systems for processing medical instruments. *Materials and methods.* To study the processes of multi-position regulation, a laboratory setup was developed based on the Smart Base profi PEP Modular Computer controller. In the ISaGRAF 3.32 development environment, in the language of functional block diagrams FBD (Function Block Diagram), a program was created that implements a four-position temperature control system in the chamber of a laboratory setup. In the Matlab (Simulink) software environment, the process of temperature control in the installation chamber is implemented. *Results.* As a result of the considered research methods, it was proved that during the heating of the chamber and the action of disturbances, all 3 stages of energy supply work. During the sterilization period, when temperature maintenance is necessary and a small amount of energy is required, only the last low power stage operates. *Conclusions.* The advantage of multi-position control systems in comparison with the two-position control method is shown.

**Keywords:** on-off control systems, multi-position regulation, simulation modeling, dry-air sterilizers, controller, ISaGRAF

**For citation:** Frolov S.V., Savinova K.S., Ilyin G.P., Vetrov A.N. The use of effective on-off control systems for medical equipment tasks. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(1):100–110. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-6

### Введение

В первой части исследования [1] отмечалось, что позиционное регулирование (англ. on-off control, Bang-bang control) широко применяется в медицинской технике, где исполнительный механизм имеет два положения: «открыть» (ON) и «закрыть» (OFF). В медицинских изделиях наиболее распространены системы позиционного регулирования температуры, например в суховоздушных стерилизаторах. Одним из показателей эффективности работы подобных медицинских изделий является время выхода на рабочий режим. Для улучшения этого показателя целесообразно использовать не двухпозиционные [1, 2], а многопозиционные системы регулирования [3, 4]. Многопозиционные системы применяют для улучшения показателей качества управления: уменьшения времени и повышения точности регулирования. При многопозиционном регулировании энергия может передаваться объекту управления частями, которые принято называть ступенями. При этом мощность притока энергии для каждой ступени может иметь разные значения в зависимости от целей управления.

### Применение многопозиционного регулирования в системах стерилизации

Медицинские изделия, такие как стерилизационное оборудование, необходимы для медицинских учреждений, где многоразовые инструменты,

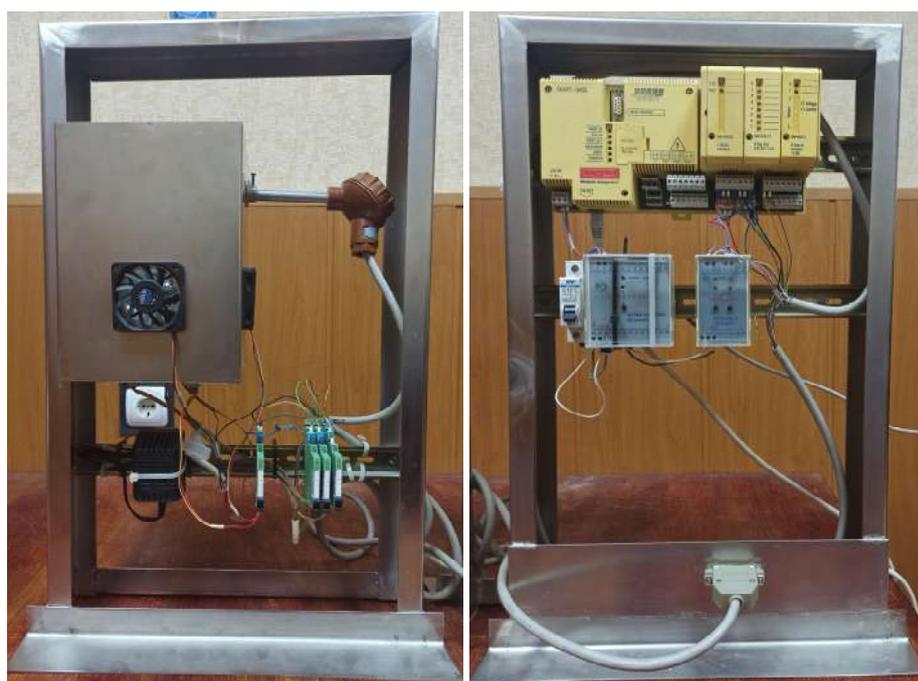
посуду следует подвергать высокотемпературной стерилизации [5, 6]. Для поддержания температурных режимов используются электрические нагреватели (ТЭНы). Камера для стерилизации с подобным ТЭНом при нагревании имеет значительную инерционность.

Для повышения производительности стерилизационного оборудования и точного поддержания температурных режимов целесообразно применять системы многопозиционного регулирования [3, 4].

Многопозиционные системы регулирования в общем случае могут иметь любое количество ступеней. Чем больше ступеней притока энергии в системе, тем меньше амплитуда колебаний регулируемой величины [3, 4].

Для стерилизационного оборудования важной характеристикой является время выхода на рабочий режим. В этом случае в многопозиционном регуляторе ступени притока энергии могут иметь разный уровень мощности. Первая ступень должна обеспечивать максимальный уровень мощности по сравнению с другими ступенями.

Для достижения эффективности работы теплового стерилизатора необходимо добиться максимальной скорости возрастания температуры до заданного значения, определяемого режимом стерилизации, а также стабильности поддержания температуры за счет использования системы многопозиционного регулирования. Для исследования процессов многопозиционного регулирования была разработана лабораторная установка на основе контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer [7] (рис. 1), состоящая из теплового объекта (рис. 1,а) и блока управления (рис. 1,б).



а)

б)

Рис. 1. Лабораторная установка для исследования многопозиционных систем регулирования на базе контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer:  
а – тепловой объект; б – блок управления

Основой теплового объекта является металлическая камера, выполненная из нержавеющей стали. Внутри камеры, в ее нижней части, расположены три нагревателя (электролампы мощностью соответственно 60 Вт, 95 Вт и 150 Вт). На боковых поверхностях металлической камеры установлены три вентилятора. В качестве датчика температуры используется термометр сопротивления ТСПУ-205. В нижней части стенда закреплена DIN-рейка, где размещен блок питания, а также блок реле для коммутации нагревательных элементов и вентиляторов. Изменение режима работы и поддержание заданной температуры объекта происходит посредством включения/выключения нагревателей.

Тепловой объект позволяет имитировать температурные режимы, аналогичные режимам, протекающим при стерилизации медицинских изделий.

В состав блока управления на базе контроллера Smart Base profi PER Modular Computer входят: металлический каркас, выполненный из нержавеющей стали, с установленными на нем DIN-рейками; контроллер, включающий в себя платы: SM-ADC1 (6-аналоговых входов) и SM-DOUT1 (8-дискретных выходов); сетевой выключатель типа ВА47-29; блоки питания БП-96 НПП «Элемер». Управляющие воздействия формируются согласно сигналам, поступающим с блока объекта управления. Связь с компьютером осуществляется по интерфейсу RS-232.

На рис. 2 представлена схема подключения теплового объекта и блока управления лабораторной установки. Установка включает в себя блок управления 1, блоки питания 2, реле 3, температурный датчик 4, лампы накаливания различной мощности 5 и вентиляторы 6, модель камеры стерилизатора 7. Три реле используются для управления включением нагревателей, четвертое реле управляет системой включения вентиляторов. Для связи с внешним устройством используются модули SM\_DOUT1 для управления включением реле и SM\_ADC1 для подключения аналоговых входов (датчик температуры).

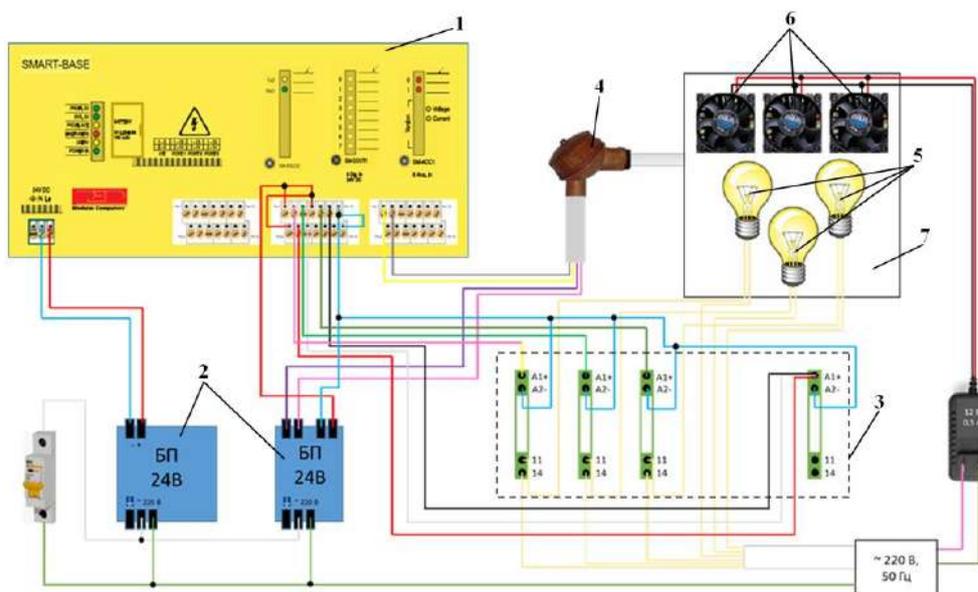


Рис. 2. Схема подключения теплового объекта и блока управления

Таким образом, в установке реализуется работа четырехпозиционной системы регулирования за счет включения/выключения трех нагревателей, различающихся по мощности. Управляющие воздействия формируются согласно алгоритму, реализованному в среде разработки ISaGRAF 3.32 [8] и загруженному в память контроллера.

На рис. 3 приведена программа, реализующая четырехпозиционную систему регулирования температуры в камере лабораторной установки на языке функциональных блоковых диаграмм FBD (Function Block Diagram) программной среды ISaGRAF 3.32 [9].

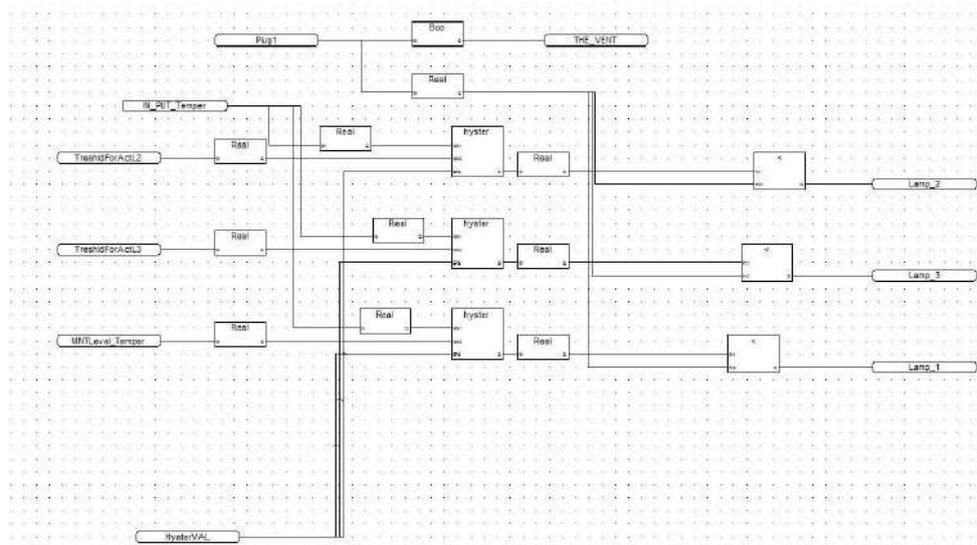


Рис. 3. Программа на языке FBD управления теплового объекта

Для работы системы регулирования используется несколько программных переменных. Переменная `IN_PUT_Temper` соответствует значению температуры в камере в условных единицах.

Переменные `Lamp_1`, `Lamp_2` и `Lamp_3` и `THE_VENT` представляют собой булевы переменные, управляющие выходными устройствами (нагревательными элементами и вентиляторами соответственно). `MNTLevel_Temp` является переменной, с помощью которой задается необходимая для поддержания температура, через переменные `TreshldForActL2`, `TreshldForActL3` задаются фиксированные границы для включения/выключения нагревательных элементов 150 и 95 Вт. Нагревательный элемент, обладающий наименьшей мощностью 60 Вт, определяет заданную температуру в камере – переменная `MNTLevel_Temp`. Переменная `HysterVAL` определяет зону возврата работы реле. Остальные переменные являются вспомогательными.

В период нагревания камеры при температуре ниже минимального порога (значение `TreshldForActL3`) работают все три ступени, как только же сигнал превысит первый порог, звено максимальной мощности отключится (`Lamp3=FALSE`). По достижении заданной температуры внутри камеры активной остается последняя ступень, которая будет поддерживать заданный уровень с минимальным отклонением. В экспериментальной установке также

используется система охлаждения, представляющая собой три вентилятора, которые активны постоянно для предотвращения перегрева.

Для реализации системы многопозиционного регулирования в программе используется блок булева гистерезиса *hyster* (рис. 4). Переменной *HysterVAL* задается величина зоны возврата реле  $\Delta = 2EPS$ . Для работы с сигналами используется блок *Real*, который переводит данные в необходимый формат.

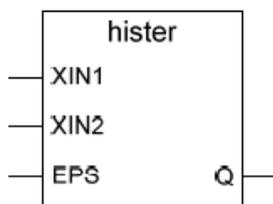


Рис. 4. Блок *hyster*

На вход *EPS* подается значение с переменной *HysterVAL*. На вход *XIN1* подается сигнал с датчика (например, переменная *IN\_PUT\_Temper*), на вход *XIN2* – граница включения/выключения нагревательного элемента (например, *TreshldForActL3*). При таком подключении выходной сигнал *Q* будет иметь значение *TRUE*, если *XIN1* перешел через  $XIN2 + EPS$ , но еще не ниже  $XIN2 - EPS$  (рис. 5).

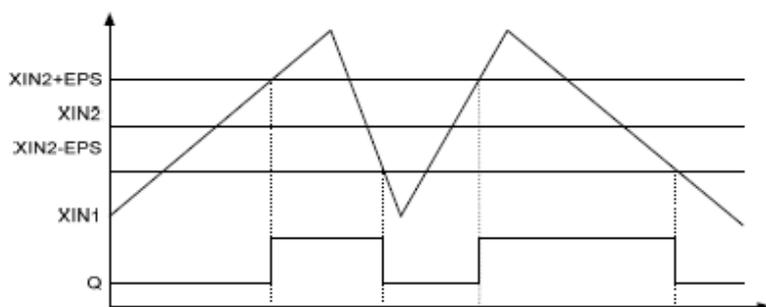


Рис. 5. Временная диаграмма блока *hyster*

В таком случае выходной сигнал будет иметь значение *TRUE* до пересечения  $XIN2 + EPS$  и *FALSE* в интервале от  $XIN2 + EPS$  до  $XIN2 - EPS$ . Для функционирования системы регулирования выходной сигнал инвертируется (инверторы реализованы на элементах сравнения). Инвертированный сигнал подается на блоки переменных, и в зависимости от его значения нагревательные элементы либо включаются, либо выключаются.

Алгоритм многопозиционных регуляторов определяется статической характеристикой – зависимостью выходных сигналов от входного.

На рис. 6 представлена статическая характеристика многопозиционной системы регулирования (см. рис. 3) с фиксированными уровнями «0», «1», «2» и «3», которые соответствуют мощностям нагревателей 0 Вт, 60 Вт, 95 Вт и 150 Вт.

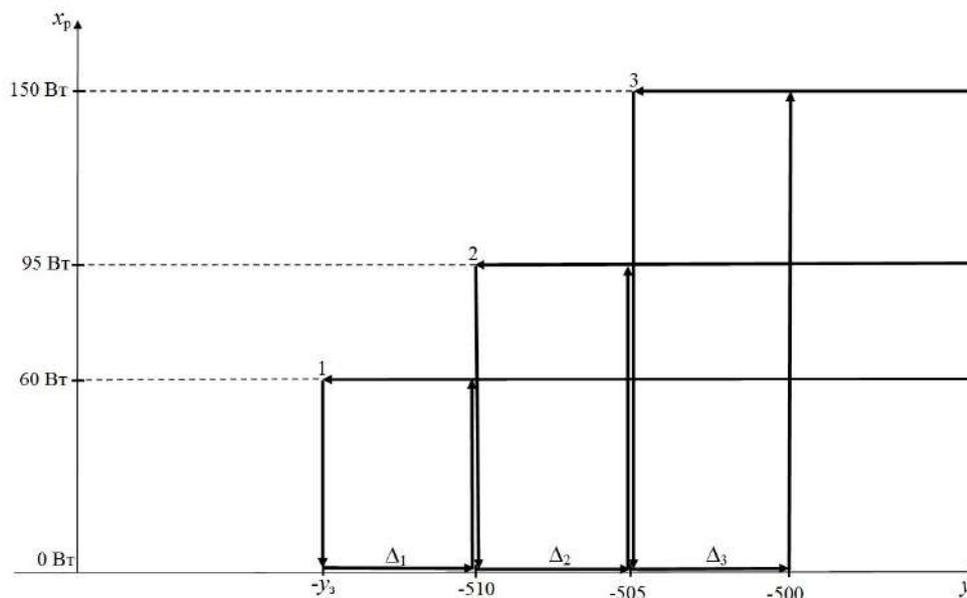


Рис. 6. Четырехпозиционная система управления

Сигнал по температуре  $y$  (рис. 6) инвертирован для возможности реализации системы многопозиционного регулирования в программной среде Matlab (Simulink) (рис. 7).

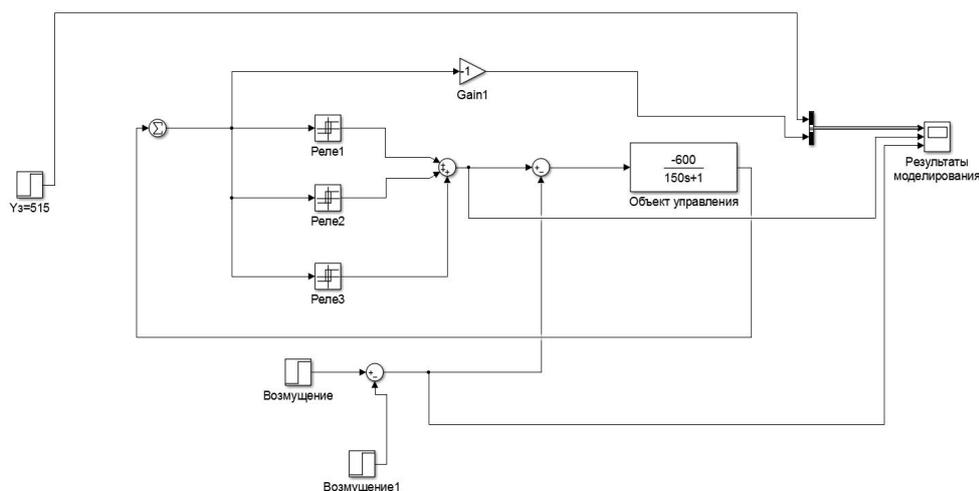


Рис. 7. Программная реализация четырехпозиционной системы регулирования в Simulink

На рис. 8 представлены результаты моделирования процесса регулирования температуры  $y$  в камере установки (см. рис. 1). На рис. 8,а показано изменение температуры в условных единицах, используемых для среды программирования контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer, где  $y_3$  – заданное значение температуры в камере. На рис. 8,б продемонстрирован процесс работы ступеней подачи энергии  $x_p$  в камеру, на рис. 8,в – влияние

возмущающего воздействия  $x_b$  (имитация открытия камеры и загрузки изделий для стерилизации).

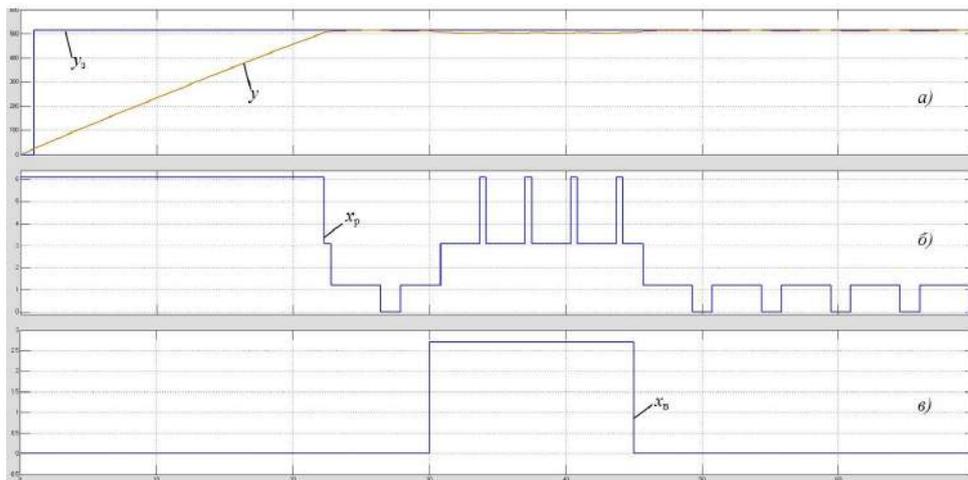


Рис. 8. Результаты моделирования четырехпозиционной системы регулирования

Как видно из графиков, в период нагрева камеры и в период действия возмущений работают все три ступени подачи энергии. В период стерилизации, когда необходимо поддержание температуры и требуется небольшое количество энергии, работает только последняя ступень низкой мощности.

#### ***Техническая реализация фиксации заданного уровня напряжения***

Подача напряжения на нагревательные элементы в лабораторной установке осуществляется за счет электромеханического реле. Исполнительный узел также может быть реализован по бесконтактному принципу, например на электронных ключах на базе комплементарных МОП транзисторов, как это показано на рис. 9. Здесь управляющее напряжение в виде логических сигналов 1 и 0 подается на вход инвертора, выходное напряжение которого реализует открытие или запираание транзистора VT1. Коммутация транзистора VT2 реализуется непосредственно входным сигналом  $U_{упр}$ . Однако применение таких схем коммутации возможно только в случае сравнительно небольших рабочих мощностей – до 150–200 Вт. Более того, здесь может быть необходимым принудительное охлаждение транзисторов.

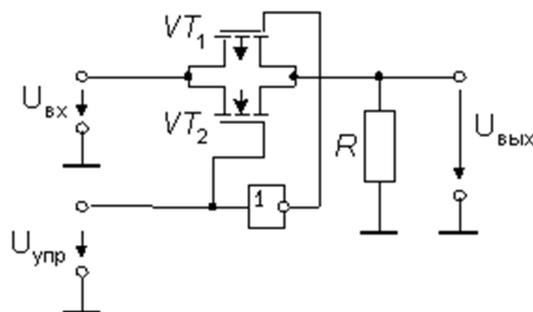


Рис. 9. Электронный ключ на базе МОП транзисторов

В лабораторной установке потребляемая максимальная мощность нагревателей составляет 150 Вт. Таким образом, здесь могут быть применены элементарные транзисторы типа КП781А (*n*-канал) и КП785А (*p*-канал) [10].

### Заключение

Анализ результатов моделирования многопозиционной системы регулирования показал ее преимущество по сравнению с двухпозиционным методом управления. За счет быстрой и удобной настройки системы регулирования удастся повысить производительность работы медицинского оборудования, а также добиться поддержания минимального отклонения от заданной величины. Наличие нескольких ступеней включения нагревателей обеспечивает улучшение качества регулирования, экономию энергии и повышение времени безотказной работы оборудования.

### Список литературы

1. Фролов С. В., Савинова К. С., Куликов А. Ю., Суконкин И. А. Использование эффективных систем позиционного регулирования для задач медицинской техники // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 50–62. doi:10.21685/2227-8486-2022-2-4
2. Ключев А. С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка. М. : Энергия, 1967. 104 с.
3. Новожилов Б. М., Козлов В. В. Обеспечение температурного режима воздушных компрессорных станций // Инженерный вестник. 2014. № 10. С. 590–599.
4. Новожилов Б. М. Многопозиционное регулирование в технологическом оборудовании // Аэрокосмический научный журнал. 2015. № 04. С. 25–36. doi:10.7463/aersp.0415.0812243
5. ГОСТ Р ИСО 20857-2016 Стерилизация медицинской продукции. Горячий воздух. Требования к разработке, валидации и текущему контролю процесса стерилизации медицинских изделий. М. : Стандартинформ, 2016. 46 с.
6. ГОСТ 31598-2012 Стерилизаторы паровые большие. Общие технические требования и методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2013. 103 с.
7. Андреев Е. Б., Попадько В. Е. Технические средства систем управления технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. М. : Нефть и газ, 2005. 272 с.
8. Колтунцев А. В., Золотарев С. В. ISAGRAF 5 – Основа для создания распределенных приложений в среде программируемых контроллеров на базе стандарта IEC61499 // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. № 12. С. 40–43.
9. Деменков Н. П. Языки программирования промышленных контроллеров : учеб. пособие / под ред. К. А. Пупкова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 172 с.
10. Петухов В. М. Транзисторы и их зарубежные аналоги. Полевые и высокочастотные биполярные транзисторы средней и большой мощности. М. : РадиоСофт, 2004. Т. 3. 672 с.

### References

1. Frolov S.V., Savinova K.S., Kulikov A.Yu., Sukonkin I.A. The use of effective positional control systems for medical equipment tasks. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):50–62. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-2-4
2. Klyuev A.S. *Dvukhpzitsionnye avtomaticheskie regulatory i ikh nastroyka = Two-position automatic regulators and their adjustment*. Moscow: Energiya, 1967:104. (In Russ.)

3. Novozhilov B.M., Kozlov V.V. Ensuring the temperature regime of air compressor stations. *Inzhenernyy vestnik = Engineering Bulletin*. 2014;(10):590–599. (In Russ.)
4. Novozhilov B.M. Multi-position regulation in technological equipment. *Aerokosmicheskiiy nauchnyy zhurnal = Aerospace scientific journal*. 2015;(04):25–36. (In Russ.). doi:10.7463/aersp.0415.0812243
5. GOST R ISO 20857-2016 *Sterilizatsiya meditsinskoy produktsii. Goryachiy vozdukh. Trebovaniya k razrabotke, validatsii i tekushchemu kontrolyu protsessa sterilizatsii meditsinskikh izdeliy = GOST R ISO 20857-2016 Sterilization of medical products. Hot air. Requirements for the development, validation and ongoing control of the sterilization process of medical devices*. Moscow: Standartinform, 2016:46. (In Russ.)
6. GOST 31598-2012 *Sterilizatory parovye bol'shie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy = GOST 31598-2012 Large steam sterilizers. General technical requirements and test methods*. Moscow: Standartinform, 2013:103. (In Russ.)
7. Andreev E.B., Popad'ko V.E. *Tekhnicheskie sredstva sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v nefyanoy i gazovoy promyshlennosti = Technical means of control systems for technological processes in the oil and gas industry*. Moscow: Neft' i gaz, 2005:272. (In Russ.)
8. Koltuntsev A.V., Zolotarev S.V. ISAGRAF 5 – The basis for creating distributed applications in the environment of programmable controllers based on the standard IEC61499. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial automated control systems and controllers*. 2008;(12):40–43. (In Russ.)
9. Demenkov N.P. *Yazyki programmirovaniya promyshlennykh kontrollerov: ucheb. posobie = Programming languages of industrial controllers : textbook*. Moscow: Izdvo MGTU im. N.E. Bauman, 2004:172.
10. Petukhov V.M. *Tranzistory i ikh zarubezhnye analogi. Polevyye i vysokochastotnyye bipolyarnyye tranzistory sredney i bol'shoy moshchnosti = Transistors and their foreign analogues. Field and high-frequency bipolar transistors of medium and high power*. Moscow: RadioSoft, 2004;3:672. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Сергей Владимирович Фролов**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой биомедицинской  
техники,  
Тамбовский государственный технический  
университет  
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
E-mail: sergej.frolov@gmail.com

##### **Sergei V. Frolov**

Doctor of technical sciences, professor,  
head of the sub-department  
of biomedical engineering,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

##### **Кристина Сергеевна Савинова**

аспирант,  
Тамбовский государственный технический  
университет  
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
E-mail: savinova.k94@mail.ru

##### **Kristina S. Savinova**

Postgraduate student,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

##### **Григорий Павлович Ильин**

студент,  
Тамбовский государственный технический  
университет  
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
E-mail: gregilyn@mail.ru

##### **Gregory P. Ilyin**

Student,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Александр Николаевич Ветров**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры биомедицинской техники,  
Тамбовский государственный технический  
университет  
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
E-mail: avetrov@yandex.ru

**Aleksandr N. Vetrov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of biomedical engineering,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 19.01.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 22.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 13.03.2023**

## ФОРМИРОВАНИЕ ИММЕРСИВНОЙ СРЕДЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ГЛУБИНОЙ ПОГРУЖЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИЯХ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А. В. Иващенко<sup>1</sup>, М. В. Александрова<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

<sup>1</sup> anton.ivashenko@gmail.com, <sup>2</sup> margarita.alexandrowa@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается актуальная проблема обеспечения иммерсивности человеко-компьютерного взаимодействия в среде дополненной реальности за счет управления глубиной погружения. *Материалы и методы.* Предложена модель иммерсивной среды, позволяющая в отличие от аналогов контролировать и управлять глубиной погружения пользователя с учетом его индивидуальных особенностей восприятия дополненной реальности. Отслеживание реакции пользователя производится с помощью системы окулографии (айтрекинга) или путем интеллектуального распознавания эмоций по результатам видеосъемки мимики лица. Модель основана на реализации метода акцентной визуализации и расширяет возможности его практического применения в задачах повышения удобства интерфейсов виртуальной и дополненной реальности, медицинской реабилитации и контроля ручных операций на производстве, в техническом обслуживании и ремонте. *Результаты.* Модель иммерсивной среды с управляемой глубиной погружения включает последовательности событий фиксации внимания пользователя и цепочки событий изменения состояния виртуальных и реальных объектов в пространстве и времени, что позволяет реализовать мониторинг базовых параметров, характеризующих восприятие пользователя: фокус, релевантность и неустойчивость. На базе предложенной модели была реализована система управления, обеспечивающая достижение статистического соответствия темпо-ритмов процессов распознавания, классификации и адекватного действия относительно реальных и виртуальных объектов. *Выводы.* Основные проблемы потери глубины погружения пользователя в среду иммерсионной реальности включают несоответствие контекстов виртуальных и реальных элементов опыту пользователя, различие темпов событий, происходящих в виртуальной реальности темпу реальных событий или готовности пользователя, наличие отвлекающих факторов, влияющих на потерю вовлеченности и снижение восприятия. Выбор направления борьбы с этими проблемами зависит от динамики изменения параметров.

**Ключевые слова:** иммерсивная реальность, дополненная реальность, пользовательские интерфейсы, медицинская реабилитация, акцентная визуализация

**Для цитирования:** Иващенко А. В., Александрова М. В. Формирование иммерсивной среды с управляемой глубиной погружения в приложениях дополненной реальности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 111–124. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-7

## DEVELOPMENT OF IMMERSIVE ENVIRONMENT WITH CONTROLLED DEPTH PERCEPTION IN AUGMENTED REALITY APPLICATIONS

A.V. Ivaschenko<sup>1</sup>, M.V. Aleksandrova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Samara State Medical University, Samara, Russia  
<sup>1</sup>anton.ivashenko@gmail.com, <sup>2</sup>margarita.alexandrowa@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The paper discusses an actual problem of ensuring the immersiveness of human-computer interaction in the Augmented Reality environment by controlling the depth of immersion. *Materials and methods.* The article proposes a model of an immersive environment, which, unlike analogues, allows controlling and managing the depth of user immersion, taking into account his individual characteristics of Augmented Reality perception. The user's reaction is tracked using the oculography (eye-tracking) system or by intelligent recognition of emotions based on the results of image recognition of facial expressions. The model is based on the implementation of the accented visualization method and expands the possibilities of its practical application in the tasks of improving the convenience of virtual and augmented reality interfaces, medical rehabilitation and control of manual operations in production, maintenance and repair. *Results.* An immersive environment model with a controlled depth of immersion processes the event chains of user attention fixation and changing the state of virtual and real objects in space and time, which makes it possible to monitor the basic parameters that characterize user perception: focus, relevance, and instability. On the basis of the proposed model, a control system was implemented that ensures the achievement of a statistical correspondence between the tempo-rhythms of the processes of recognition, classification and adequate action in relation to real and virtual objects. *Conclusions.* The main challenges of losing the depth of user immersion in the immersive reality environment include the discrepancy between the contexts of virtual and real elements and the user experience, the difference between the pace of events taking place in virtual reality and the pace of real events or the user's readiness, and the presence of distractions that affect the loss of involvement and decrease in perception. The choice of the solution depends on the dynamics of changes in parameters.

**Keywords:** immersive reality, augmented reality, user interfaces, medical rehabilitation, accented visualization

**For citation:** Ivaschenko A.V., Aleksandrova M.V. Development of immersive environment with controlled depth perception in augmented reality applications. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):111–124. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-7

### Введение

Применение технологий виртуальной и дополненной реальности крайне востребовано в современных приложениях производственного контроля качества, медицинской реабилитации, интерактивных справочных руководствах, системах компьютерного зрения, в игровой индустрии и т.п. Такие технологии способны существенно расширить возможности пользовательских интерфейсов программно-аппаратных комплексов различного назначения, повышая вовлеченность пользователя и его заинтересованное участие в интерактивном взаимодействии.

Однако на практике реализация таких интерфейсов затруднена в силу усложнения процессов человеко-компьютерного взаимодействия. Включение

виртуальных элементов в реальные сцены приводит к существенному повышению информационной нагрузки на человека, а влияние негативного индивидуального опыта и особенностей восприятия на эффективность применения технологий виртуальной и дополненной реальности может нивелировать преимущества их применения на практике. Кроме этого, необходимость постоянного использования дополнительных специализированных устройств, таких как очки, шлемы дополненной реальности, экраны смартфонов или планшетов, затрудняют внедрение данного вида технологий в оперативной или производственной деятельности.

Для преодоления этой проблемы необходимо построить адаптивную систему управления глубиной погружения, обеспечивающей независимый контроль индивидуальных свойств восприятия каждого отдельного пользователя в режиме реального времени с учетом персональных особенностей его поведения в смешанном пространстве виртуальной и дополненной реальности. Анализ поведения пользователя и его изменений в ответ на появление виртуальных объектов, контроль внимания и мониторинг уставания позволяет внедрить в систему управления интерактивным пользовательским интерфейсом возможности независимой обратной связи.

Такая система управления нужна, например, в аппаратно-программных комплексах контроля качества производственных процессов или медицинской реабилитации, где требуется от пользователя определенная реакция на изменение виртуального пространства или выполнение заданного набора действий. Появление обратной связи в соответствующей системе управления позволяет оценивать и корректировать эффективность воздействия виртуальной среды на пользователя, т.е. адекватность и надежность выполнения необходимого набора действий, путем регулирования количества и сложности виртуальных объектов. В рамках решения этой задачи в данной статье предлагаются оригинальные модель и метод формирования иммерсивной среды с управляемой глубиной погружения в приложениях дополненной реальности.

### *Материалы и методы*

Иммерсивные технологии объединяют различные аудиовизуальные методы и средства частичного или полного погружения человека в искусственно созданную среду [1, 2]. Исторически иммерсивность связывалась с произведениями изобразительного искусства, музыкальными и театральными постановками, предметами архитектуры [3], в которых вовлечение человека обеспечивается за счет высоких конструктивных или эстетических свойств художественного произведения, эмоционального вовлечения зрителя или слушателя либо интерактивного взаимодействия с ним. Современные технологии виртуальной и дополненной реальности [4, 5] предоставляют новые возможности по реализации иммерсивности на техническом уровне путем высокореалистичного моделирования, симуляции и визуализации искусственного окружения в контексте естественного и реального опыта конкретного пользователя.

Важной характеристикой иммерсивности является глубина погружения, на которую влияют индивидуальные особенности восприятия [6, 7]. Погружение в иммерсивную среду характеризуется осознанным переходом человека в состояние присутствия в искусственно созданном альтернативном пространстве,

который связан с преодолением недоверия. Для этого он должен подвергнуться определенному воздействию, которое формально можно представить в виде временной последовательности аудиовизуальных стимулов, призванных захватить и удержать внимание пользователя. На эффективность этих стимулов может влиять накопленный опыт человека и его восприимчивость к определенным визуальным образам и связанным с ними ассоциациям.

Данное воздействие может иметь длительный характер и требовать не только концентрации внимания пользователя, но и сохранения его высокой заинтересованности. При этом он может быть подвергнут отвлекающим воздействиям, характеризующимся информационными или реальными событиями, нарушающими эффект присутствия. Внешний шум, телефонный звонок или появление неудобства от использования шлема виртуальной реальности – все это может привести к снижению восприятия и потере иммерсивности.

В связи с этим в психологии иммерсивность тесно связывается с понятием когнитивного контроля [8, 9] – комплекса исполнительных функций, позволяющих индивиду регулировать поведение согласно текущим задачам. Показано [8], что выраженность чувства присутствия может зависеть от эффективности контрольных функций переключения, подавления интерференции и обновления рабочей памяти. Эффективность когнитивного контроля человека как его индивидуальная особенность восприятия иммерсивной среды оказывает влияние на возникновение чувства присутствия при взаимодействии пользователя с виртуальными сценариями.

Философские аспекты поведения человека в иммерсивной среде [10] также связаны со специфической темпоральностью виртуальной реальности, определяющей интерактивность человеко-компьютерного взаимодействия. Уровень интерактивности непосредственно связывается с глубиной погружения, которая определяется степенью доверия пользователя к наблюдаемым событиям и явлениям. Конечно, в иммерсивной среде не идет речь о полном «вживлении», каждый пользователь находится в сознании и сохраняет способность различать реальные и виртуальные объекты. Однако на уровне восприятия он приобретает способность взаимодействовать с ними единым способом, что характеризует полное погружение.

В качестве характеристик восприятия обычно рассматривают целостность, предметность, константность, избирательность, осмысленность и др. [11]. Эти свойства индивидуальны для каждого человека и в среде иммерсивной реальности могут быть статистически определены на основе взаимного корреляционного анализа временных рядов [12], характеризующих поток формируемых аудиовизуальных стимулов и соответствующие последовательности действий пользователей, фиксируемых системой обратной связи.

Для построения системы обратной связи использовалась система окулографии (айтрекинга) [13, 14], система компьютерного зрения для анализа психоэмоционального состояния человека, а также система семантико-статистического анализа журнала событий, характеризующих действия пользователя в виртуальной среде. Некоторые результаты применения систем обратной связи для анализа поведения пользователей приведены в работах [15, 16].

Здесь же изложен основной метод, на основе которого предлагается построить иммерсивную среду с управляемой глубиной погружения – это метод акцентной визуализации [17, 18] и основанный на нем метод виртуальной

разметки [19]. Суть метода акцентной визуализации заключается в управлении вниманием пользователей на основе комбинирования сценария, фокуса, контекста и оверлейного контекста в рамках одной виртуальной сцены. Это позволяет эффективно генерировать иммерсивные стимулы в виде отметок, напоминаний и других активных элементов пользовательского интерфейса дополненной реальности.

Следует отметить, что рассматриваемые проблемы анализа пользовательского восприятия элементов виртуальной среды достаточно глубоко изучаются в рамках теории эргономики пользовательских интерфейсов [20–22] для повышения удобства человеко-компьютерных интерфейсов и стимулирования творческого потенциала пользователей [23, 24].

На основе приведенных методов и технологий можно реализовать техническую возможность управления глубиной погружения пользователя иммерсивной среды. В основе системы управления лежит персонализация пользовательских интерфейсов дополненной реальности на основе анализа их активности. Формирование иммерсивной среды производится с помощью смартфонов, видеопанелей или очков виртуальной (дополненной) реальности. Отслеживание реакции пользователя производится с помощью системы окулографии (айтрекинга) или путем интеллектуального распознавания эмоций по результатам видеосъемки мимики лица. Интеллектуальное программное обеспечение компьютерного зрения используется также для распознавания изображений реальных объектов и их сравнения с соответствующим описанием в базе знаний. Таким образом, появляется новая возможность анализа особенностей восприятия оператора в интерактивных человеко-компьютерных интерфейсах.

#### ***Модель иммерсивной среды с управляемой глубиной погружения***

Рассмотрим персонифицированную формальную модель иммерсивной среды для пользователя  $u_i$ , где  $i = 1 \dots N_u$  – условный порядковый номер (идентификатор) пользователя.

Определим координаты взора как  $s_j = (x_j, y_j, z_j)$  – точку в виртуально-реальном трехмерном пространстве  $\Phi_q$ , где  $j$  – условный порядковый номер точки в составе траектории взора пользователя. Будем при этом обозначать реальное пространство  $\Phi_0$  – совокупность реальных объектов, наблюдаемых пользователем.

Отметим, что при использовании единственного экрана устройства, на котором формируется виртуальная среда с объектом – зрительным раздражителем, координаты взора определяют как точку пересечения оптической оси глазного яблока и плоскости наблюдаемого объекта или экрана.

Однако в случае виртуальной или дополненной реальности виртуальная среда становится трехмерной, вследствие чего виртуальные и реальные объекты могут перекрывать друг друга и накладываться, пересекаясь в пространстве. Далее будем использовать единую систему координат для реального и всех виртуальных пространств, в противном случае потребуются приведение координат.

Обозначим событие фиксации взора пользователя в некоторой координате реального или виртуального пространства в течение минимально необходимого интервала времени  $\Delta\xi = \text{const}$  в виде булевой переменной:

$$g_{i,j,k} = g_{i,j,k}(u_i, s_j, t_{i,j,k}) = \{0, 1\}, \quad (1)$$

где  $t_{i,j,k}$  – время наступления события;  $k$  – порядковый номер события.

Параметр  $\Delta\xi$  определяет чувствительность метода.

Последовательность событий привлечения взгляда пользователя, упорядоченная по времени, образует маршрут на графе  $G = \{g_{i,j,k}\}$ .

Упорядоченность по времени характеризуется условием:

$$\forall g_{i,j,k}, \exists g_{i,j,k+1} : t_{i,j,k+1} > t_{i,j,k}; \nexists g_{i,j,k'} : k' \neq k, k' \neq k+1 : t_{i,j,k'} \in (t_{i,j,k}, t_{i,j,k+1}), \quad (2)$$

где  $k'$  – порядковый номер события.

Как мы указывали выше, пользователь способен распознавать реальные и виртуальные объекты и осознает различия между ними. Однако в процессе интерактивного взаимодействия в иммерсивной среде он реагирует на них одинаково, т.е. их распознавание, классификация и адекватное действие занимает сравнительно одинаковые интервалы относительно реальных и виртуальных объектов соответственно.

Обозначим объект реального или виртуального мира в виде  $b_n(\varphi_q)$ , где  $n = 1 \dots N_b$  – идентификатор объекта в рамках сквозной нумерации.

Обозначим событие изменения состояния объекта, вызванное его появлением, перемещением или модификацией в виде

$$d_{n,j,m} = d_{n,j,m}(b_n, s'_j, t'_{n,j,m}) = \{0, 1\}, \quad (3)$$

где  $s'_j$  – координата наступления события;  $t'_{n,j,m}$  – время его наступления;  $m$  – порядковый номер события изменения состояния объекта.

Поток упорядоченных по времени событий  $d_{n,j,m}$  характеризует появление и перемещение объекта:

$$\forall b_n : \forall d_{n,j_1,m} : \exists d_{n,j_2,m+1} : t'_{n,j_2,m+1} > t'_{n,j_1,m}, \quad (4)$$

Опишем в виде функции событие остановки взора пользователя на конкретном объекте, характеризующее его фокус (внимание) в заданный интервал времени  $\Delta T$ :

$$F(u_i, b_n, \Delta T) = \sum_{j_1,k} \sum_{j_2,m} (g_{i,j_1,k}(u_i, s_{j_1}, t_{i,j_1,k}) d_{n,j_2,m}(b_n, s'_{j_2}, t'_{n,j_2,m}) \times \delta(s_{j_1} \in (s'_{j_2} \pm \vartheta_{nl})) \delta(t_{i,j_1,k} \in (t'_{n,j_2,m}, t'_{n,j_2,m+1})) \delta(t_{i,j_1,k} \in \Delta T)), \quad (5)$$

где  $\vartheta_{n_l}$  – окрестность точки в пространстве;  $\delta(x) = \begin{cases} 1, x = true; \\ 0, x = false. \end{cases}$

При анализе восприятия пользователя кроме фокуса, характеризующего своевременное внимание к заданному объекту, необходимо оценивать релевантность рассматриваемых объектов текущему интересу:

$$R(u_i, \Omega^*, \Delta T) = \sum_{j1,k} \sum_{j2,m} \left( g_{i,j1,k}(u_i, s_{j1}, t_{i,j1,k}) d_{n,j2,m}(b_n, s'_{j2}, t'_{n,j2,m}) \delta(\Omega(b_n) \in \Omega^*) \delta(t_{i,j1,k} \in \Delta T) \right), \quad (6)$$

где  $\Omega(b_n) = \{(\omega_{n,l}, w_{n,l})\}$  – семантический дескриптор, описывающий тематику рассматриваемого объекта в виде облака тегов (ключевых слов)  $\omega_{n,l}$  с весами  $w_{n,l}$ ,  $\Omega^*$  – заданная (целевая) тематика интереса пользователя.

Текущий  $\Omega(b_n(\varphi_0))$  и целевой  $\Omega^*$  интересы пользователя могут не совпадать. Считаем, что в процессе своей деятельности пользователь должен уделять внимание реальным объектам в рамках пространства  $\varphi_0$ . Интересы полностью совпадают, если  $\Omega(b_n) \in \Omega^*$ .

Отметим, что интерес пользователя не всегда совпадает с объектами, которым он уделяет внимание. Несмотря на наличие взаимосвязи визуальной системы и сознания человека, заключающейся в том, что фиксация взгляда на рассматриваемом объекте по длительности и интересу соответствует когнитивному процессу, возможно появление скрытого внимания. Скрытое внимание характеризуется треком движения глаз, при котором след взгляда и точки фиксации часто проходят мимо объектов, к которым реально привлекалось внимание.

Важной характеристикой глубины погружения является восприимчивость к отвлекающим воздействиям, т.е. неустойчивость. Количественно оценить данную характеристику можно путем подсчета нерелевантных объектов, попавших в его фокус, т.е. тех, на которые он обращал внимание:

$$D(u_i, \Omega^*, \Delta T) = \sum_{j1,k} \sum_{j2,m} \left( g_{i,j1,k} d_{n,j2,m} \delta(F(u_i, b_n, \Delta T) \geq 0) \delta(R(u_i, \Omega^*, \Delta T) = 0) \right) \rightarrow \min \quad (7)$$

Таким образом, модель иммерсивной среды с управляемой глубиной погружения включает последовательности событий фиксации внимания пользователя и цепочки событий изменения состояния виртуальных и реальных объектов в пространстве и времени, что позволяет реализовать мониторинг базовых параметров, характеризующих восприятие пользователя: фокус  $F$  (предметность), релевантность  $R$  (избирательность) и неустойчивость  $D$  (обратная константности).

### Результаты

Рассмотрим в качестве объекта управления поведение пользователя в смешанном пространстве иммерсивной реальности, образованным

реальными и виртуальными объектами, которое описывается последовательностью действий, ожидаемых в ответ на внешние события. Основным контролируемым параметром при этом – глубина погружения.

Закон управления в этом случае можно сформулировать следующим образом: если релевантность объектов в фокусе падает, необходимо сформировать адекватную текущему восприятию пользователя последовательность аудиовизуальных стимулов и передать ее пользователю в рамках оверлейного контекста иммерсивной среды.

Для последовательности непересекающихся временных окон  $\Delta T_q = (t_{q, \text{нач}}^*, t_{q, \text{ок}}^*)$  величину рассогласования текущего и целевого интереса пользователя можно оценить в виде

$$\xi(u_i, \Omega^*, \Delta T_q) = \delta(R(u_i, \Omega^*, \Delta T_q) < R(u_i, \Omega^*, \Delta T_{q-1})) \times \\ \times (R(u_i, \Omega^*, \Delta T_{q-1}) - R(u_i, \Omega^*, \Delta T_q)). \quad (8)$$

Данный параметр характеризует изменения глубины погружения. При потере внимания необходимо произвести стимулирующее воздействие в виде набора аудиовизуальных стимулов с силой воздействия  $V^*$ , которое в простейшем случае определяется линейной функцией

$$V^*(u_i, \Omega^*, \Delta T_q) = k\xi(u_i, \Omega^*, \Delta T_q). \quad (9)$$

В рамках предложенной модели закон управления можно представить следующим образом. Набор аудиовизуальных стимулов для включения в оверлейный контекст:

$$\Phi_{\text{об}, q} \ni \{b_{n^*}(\Phi_{\text{об}, q})\}_q : W(\Phi_{\text{об}, q}) = \sum_{n^*} (V(b_n(\Phi_{\text{об}})) \delta(\Omega(b_n(\Phi_{\text{об}})) \in \Omega^*)) \times \\ \times F(u_i, b_n(\Phi_{\text{об}}), \Delta T_{q+1}) \rightarrow V^*(u_i, \Omega^*, \Delta T_q), \quad (10)$$

где  $V(b_n(\Phi_{\text{об}}))$  – ожидаемая или прогнозная эффективность привлечения внимания с помощью виртуального объекта, используемого в качестве аудиовизуального стимула.

Задача включения набора аудиовизуальных стимулов в оверлейный контекст может быть решена как обобщенная задача о назначениях, при этом для выражения (10) может быть несколько вариантов решения. Формирование аудиовизуального стимула способствует синхронизации событий изменения состояния объектов  $d_{n,j,m}$  и фиксации взора пользователя  $g_{i,j,k}$ , что характеризует темпо-ритм поведения пользователя в иммерсивной среде.

На базе предложенной модели была реализована система управления глубиной погружения пользователя иммерсивной среды, структура которой представлена на рис. 1.

В качестве основного контролируемого параметра использована неустойчивость восприятия применительно к генерируемым виртуальным

объектам. Основной целью системы управления глубиной погружения является, таким образом, достижение статистического соответствия темпо-ритмов процессов распознавания, классификации и адекватного действия.

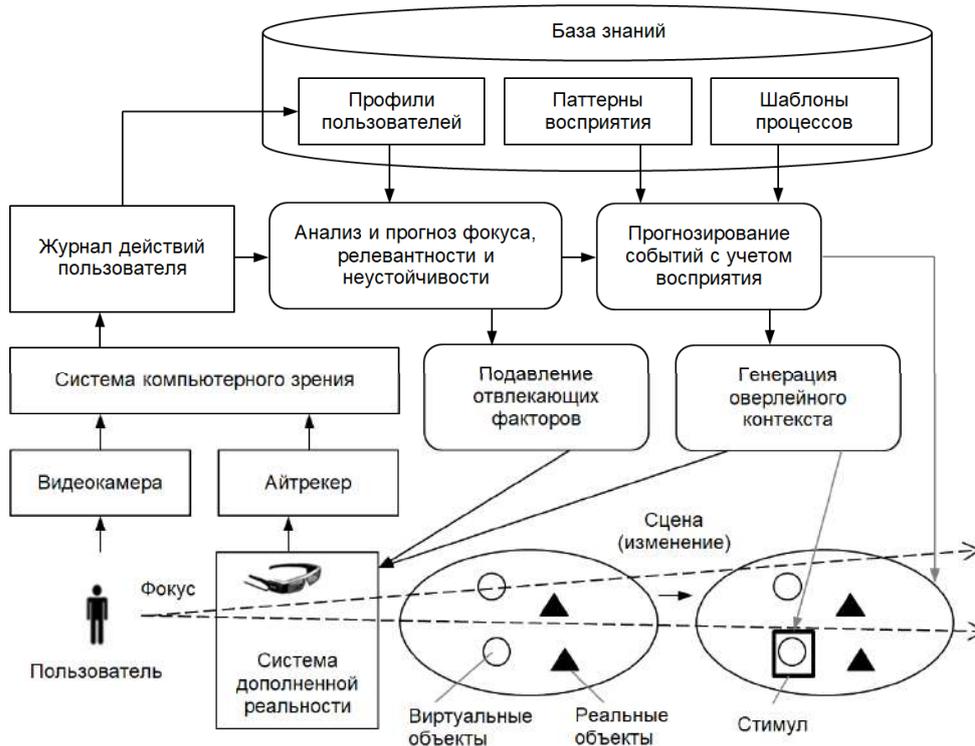


Рис. 1. Структура системы управления глубиной погружения пользователя иммерсивной среды

В качестве управляющего воздействия предложено генерировать оверлейный контекст – последовательность аудиовизуальных стимулов, корректирующих темпо-ритм интерактивного взаимодействия пользователя с виртуальной средой с учетом человеческого фактора с целью достижения требуемого уровня иммерсивного погружения и устойчивого сохранения его на длительном интервале времени.

Важным элементом решения является прогнозирование действий пользователя на основе сопоставления его профиля и шаблонов типовых процессов. В результате удастся достроить граф событий восприятия реальных и виртуальных объектов в иммерсивной среде с учетом позитивных и негативных ожиданий действий пользователя и повысить эффективность генерации стимулов.

Следует отметить, что частое применение аудиовизуальных стимулов невозможно в связи с риском информационной перегрузки пользователя. Необходимо обеспечивать своевременное и адекватное применение данного инструмента в практических приложениях. В рамках предложенной модели данное решение производится путем выбора вида функции  $V^*(u_i, \Omega^*, \Delta T_q)$  и решения задачи (10).

Результаты практического построения иммерсивной среды с управляемой глубиной погружения могут быть проиллюстрированы примером

реализации системы контроля качества производства автомобильных компонентов, разработанной ООО «Самараавтожгут» и ООО «Открытый код» [25]. Модуль контроля факта выполнения операций на этапе сборки и тестирования жгутов (рис. 2) позволяет в режиме реального времени на основании интеллектуального распознавания и видеоаналитики указывать оператору на допущенные ошибки.

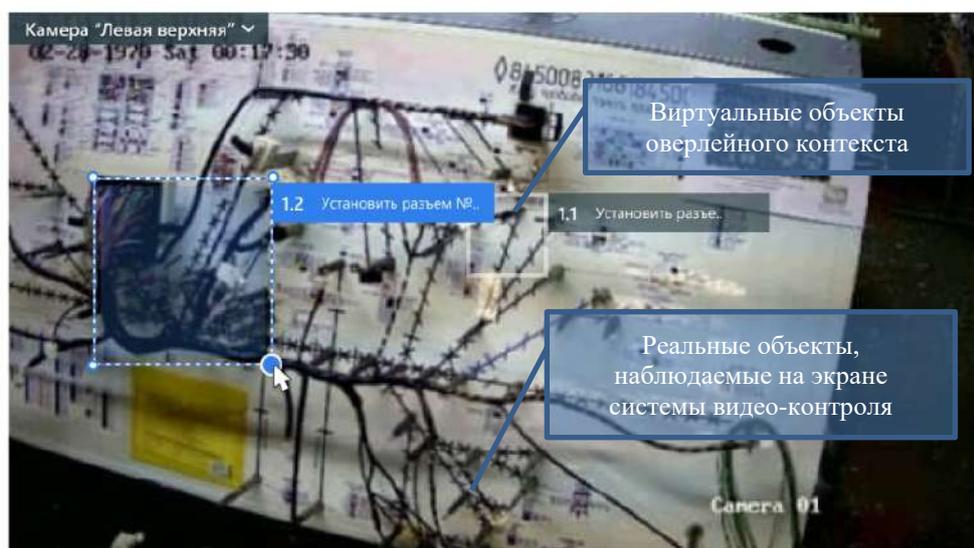


Рис. 2. Реализация иммерсивной реальности в системе производственного контроля

Применение современных технологий компьютерного зрения на базе искусственных нейронных сетей позволили идентифицировать погрешности ручных операций и снизить время обработки задач на 30 %, а количество допущенных отклонений – до 1 %. Это достаточно хорошие показатели для интеллектуальной системы контроля качества.

Однако практическое применение такого рода систем связано с необходимостью их адаптации в условиях работы отдельных пользователей, что часто требует индивидуального подхода. Обычно проблемы синхронизации работы человеко-машинных комплексов решаются либо путем повышения доли автоматизации и исключения человека в рамках отдельных технологических операций, либо путем стандартизации и разграничения ролей и конкретных трудовых функций. В данном случае это сделать сложно, поскольку у разных пользователей интеллектуальная система производственного контроля компенсирует разные недостатки.

Кроме этого, в такого рода системах возникает проблема обеспечения напряженной и ритмичной производственной деятельности персонала в течение производственной смены с учетом необходимости постоянного использования устройств компьютерного зрения, виртуальной и дополненной реальности, требующих периодического осмотра и настройки. Программное обеспечение контроля глубины погружения, основанное на предложенной в данной статье модели, способно решать такого рода задачи на практике.

### **Выводы**

Успешность реализации человеко-компьютерного взаимодействия в иммерсивной среде существенно зависит от особенностей восприятия пользователями результатов комбинации реальных объектов и виртуальных объектов дополненной реальности. На устойчивость интереса, предметность, избирательность и константность восприятия в этом случае существенное влияние оказывает глубина погружения, которая характеризует единство темпо-ритмов процессов распознавания, классификации и адекватного действия относительно реальных и виртуальных объектов.

Глубина погружения может быть оценена путем семантико-статистического анализа таких параметров пользовательского поведения, как фокус, релевантность и неустойчивость. Эти параметры индивидуальны для конкретного человека и иммерсивной среды и учитывают влияние человеческого фактора на возможности человеко-компьютерного взаимодействия. Применение этих параметров в составе аппаратно-программных комплексов виртуальной и дополненной реальности позволяет обеспечить и сохранить эффект иммерсивности.

Основные проблемы потери глубины погружения пользователя в среду иммерсионной реальности включают несоответствие контекстов виртуальных и реальных элементов опыту пользователя, несоответствие темпа событий, происходящих в виртуальной реальности, темпу реальных событий или готовности пользователя, наличие отвлекающих факторов, влияющих на потерю вовлеченности и снижение восприятия.

Выбор направления борьбы с этими проблемами зависит от динамики изменения параметров. В первую очередь необходимо обеспечить согласование ритмов появления и изменения виртуальных объектов, обеспечив тем самым функционирование в режиме реального времени. Следующим шагом является обеспечение строгого контроля появления отвлекающих факторов для своевременной генерации противодействующих стимулов. Наконец, формирование достаточно информативного оверлейного контекста способно нивелировать отсутствие или недостаток опыта пользователя иммерсивной среды.

### *Заключение*

В статье предложена модель иммерсивной среды, позволяющая в отличие от аналогов контролировать и управлять глубиной погружения пользователя с учетом его индивидуальных особенностей восприятия дополненной реальности. Модель основана на реализации метода акцентной визуализации и расширяет возможности его практического применения в задачах повышения удобства интерфейсов виртуальной и дополненной реальности, медицинской реабилитации и контроля ручных операций на производстве, в техническом обслуживании и ремонте.

Дальнейшее направление исследований связано с изучением психоэмоциональных особенностей восприятия систем и устройств виртуальной и дополненной реальности на основе разработанной модели. Планируется реализация специализированных аппаратно-программных комплексов для повышения эффективности применения технологий дополненной реальности и машинного зрения для контроля качества производства, а также в медицинской реабилитации.

### *Список литературы*

1. Cochrane T., Sissons H. An introduction to immersive reality // *Pacific Journal of Technology Enhanced Learning*. 2019. Vol. 2. P. 6. doi:10.24135/pjtel.v2i1.28
2. Kaplan-Rakowski R., Meseberg K. Immersive media and their future // *Educational Media And Technology Yearbook*. 2018. Vol. 42. P. 143–153. doi:10.1007/978-3-030-27986-8\_13
3. Bai H. The exploration of Arnheim's theory of visual perception in the field of art appreciation and review in junior high school // *Learning & Education*. 2020. Vol. 9. P. 139. doi:10.18282/l-e.v9i2.1428
4. Ejaz A., Ali S. A., Ejaz M. Y., Siddiqui F. A. Graphic user interface design principles for designing Augmented Reality applications // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019. Vol. 10. P. 209–216.
5. Singh M., Singh M. P. Augmented Reality interfaces // *Natural Web Interfaces IEEE Internet Computing*. 2013. P. 66–70.
6. Авербух Н. В. Психологические аспекты феномена присутствия в виртуальной среде // *Вопросы психологии*. 2010. № 5. С. 105–113.
7. Witmer B., Singer M. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire // *Presence*. 1998. Vol. 7. P. 225–240.
8. Величковский Б. Б., Гусев А. Н., Виноградова В. Ф., Арбекова О. А. Когнитивный контроль и чувство присутствия в виртуальных средах // *Экспериментальная психология*. 2016. Т. 9, № 1. С. 5–20. doi:10.17759/exppsy.2016090102
9. Войскунский А. П., Меньшикова Г. Я. О применении систем виртуальной реальности в психологии // *Вестник Московского университета. Серия 14. Психология*. 2008. № 1. С. 22–36.
10. Кирик Т. А. Виртуальная реальность и ее онтологические прототипы. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2007. 133 с.
11. Любимов В. В. Психология восприятия : учебник. М. : Эксмо : ЧеРо : МПСИ, 2007. 472 с.
12. Прикладной анализ случайных процессов / под ред. С. А. Прохорова. Самара : Издательство СНЦ РАН, 2007. 582 с.
13. Jacob R. J. K., Karn K. S. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: ready to deliver the promises // *The mind's eye: cognitive and applied aspects of eye movement research*. 2003. P. 573–605.
14. Duchowski A. T. A breadth-first survey of eye tracking applications // *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers (BRMIC)*. 2002. Vol. 34. P. 455–470.
15. Ivaschenko A. V., Sitnikov P. V., Diyazitdinova A. R. Accented visualization application in interactive manuals for technical training and support // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1691. P. 1–6. doi:10.1088/1742-6596/1691/1/012122
16. Surnin O., Sitnikov P., Gubinkiy A. [et al.]. Augmented reality implementation for comfortable adaptation of disabled personnel to the production workplace // *Proceedings of the 35th Annual European Simulation and Modelling Conference*. 2021. P. 64–69.
17. Иващенко А. В., Ситников П. В. Акцентная визуализация в интеллектуальных системах производственного контроля // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. № 4. С. 94–102.
18. Ivaschenko A., Sitnikov P., Surnin O. Accented visualization for Augmented Reality // *Emerging Topics and Questions in Infocommunication Technologies*. 2020. P. 74–97.
19. Ivaschenko A., Krivosheev A. User experience analysis based on a virtual mark-up approach // *Communications in Computer and Information Science*. 2021. Vol. 1448. P. 575–586. doi:10.1007/978-3-030-87034-8\_42
20. Roth R. User interface and user experience (UI/UX) design // *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*. 2017. doi:10.22224/gistbok/2017.2.5
21. Nurpalah A., Pasha M., Rhamdhan D. [et al.]. Effect of UI/UX designer on front end // *International Journal of Research and Applied Technology*. 2021. Vol. 1. P. 335–341.
22. Malewicz M., Malewicz D. Designing user interfaces. Hype, 2020. 419 p.

23. Soegaard M., Dam R. F. The encyclopedia of human-computer interaction. Interaction Design Foundation. 2nd ed. 2014.
24. Dhengre S., Mathur J., Oghazian F. [et al.]. Towards enhanced creativity in interface design through automated usability evaluation // Eleventh International Conference on Computational Creativity ICC20. 2020. P. 366–369.
25. Sitnikov P., Gubinskiy A., Ivaschenko A., Nikiforova T. Computer vision application for mechanical engineering production manual operations control // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2402. P. 40025.

### *References*

1. Cochrane T., Sissons H. An introduction to immersive reality. *Pacific Journal of Technology Enhanced Learning*. 2019;2:6. doi:10.24135/pjtel.v2i1.28
2. Kaplan-Rakowski R., Meseberg K. Immersive media and their future. *Educational Media And Technology Yearbook*. 2018;42:143–153. doi:10.1007/978-3-030-27986-8\_13
3. Bai H. The exploration of Arnheim's theory of visual perception in the field of art appreciation and review in junior high school. *Learning & Education*. 2020;9:139. doi:10.18282/l-e.v9i2.1428
4. Ejaz A., Ali S.A., Ejaz M.Y., Siddiqui F.A. Graphic user interface design principles for designing Augmented Reality applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019;10:209–216.
5. Singh M., Singh M.P. Augmented Reality interfaces. *Natural Web Interfaces IEEE Internet Computing*. 2013:66–70.
6. Averbukh N.V. Psychological aspects of the phenomenon of presence in a virtual environment. *Voprosy psikhologii = Questions of psychology*. 2010;(5):105–113. (In Russ.)
7. Witmer B., Singer M. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*. 1998;7:225–240.
8. Velichkovskiy B.B., Gusev A.N., Vinogradova V.F., Arbekova O.A. Cognitive control and a sense of presence in virtual environments. *Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental Psychology*. 2016;9(1):5–20. (In Russ.). doi:10.17759/exppsy.2016090102
9. Voyskunskiy A.P., Men'shikova G.Ya. On the application of virtual reality systems in psychology. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14. Psikhologiya = Bulletin of the Moscow University. Series 14. Psychology*. 2008;(1):22–36. (In Russ.)
10. Kirik T.A. *Virtual'naya real'nost' i ee ontologicheskie prototipy = Virtual reality and its ontological prototypes*. Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2007:133. (In Russ.)
11. Lyubimov V.V. *Psikhologiya vospriyatiya: uchebnik = Psychology of perception : textbook*. Moscow: Eksmo: CheRo: MPSI, 2007:472. (In Russ.)
12. Prokhorov S.A. (ed.). *Prikladnoy analiz sluchaynykh protsessov = Applied analysis of random processes*. Samara: Izdatel'stvo SNTs RAN, 2007:582. (In Russ.)
13. Jacob R.J.K., Karn K.S. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: ready to deliver the promises. *The mind's eye: cognitive and applied aspects of eye movement research*. 2003:573–605.
14. Duchowski A.T. A breadth-first survey of eye tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers (BRMIC)*. 2002;34:455–470.
15. Ivaschenko A.V., Sitnikov P.V., Diyazitdinova A.R. Accented visualization application in interactive manuals for technical training and support. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1691:1–6. doi:10.1088/1742-6596/1691/1/012122
16. Surnin O., Sitnikov P., Gubinskiy A. et al. Augmented reality implementation for comfortable adaptation of disabled personnel to the production workplace. *Proceedings of the 35th Annual European Simulation and Modelling Conference*. 2021:64–69.
17. Ivashchenko A.V., Sitnikov P.V. Accent visualization in intelligent production control systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2018;(4):94–102. (In Russ.)

18. Ivaschenko A., Sitnikov P., Surmin O. Accented visualization for Augmented Reality. *Emerging Topics and Questions in Infocommunication Technologies*. 2020:74–97.
19. Ivaschenko A., Krivosheev A. User experience analysis based on a virtual mark-up approach. *Communications in Computer and Information Science*. 2021;1448:575–586. doi:10.1007/978-3-030-87034-8\_42
20. Roth R. User interface and user experience (UI/UX) design. *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*. 2017. doi:10.22224/gistbok/2017.2.5
21. Nurpalah A., Pasha M., Rhamdhan D. et al. Effect of UI/UX designer on front end. *International Journal of Research and Applied Technology*. 2021;1:335–341.
22. Malewicz M., Malewicz D. *Designing user interfaces*. Hype, 2020:419.
23. Soegaard M., Dam R.F. *The encyclopedia of human-computer interaction. Interaction Design Foundation. 2nd ed.* 2014.
24. Dhengre S., Mathur J., Oghazian F. et al. Towards enhanced creativity in interface design through automated usability evaluation. *Eleventh International Conference on Computational Creativity ICC20*. 2020:366–369.
25. Sitnikov P., Gubinskiy A., Ivaschenko A., Nikiforova T. Computer vision application for mechanical engineering production manual operations control. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2402:40025.

### **Информация об авторах / Information about the authors**

#### **Антон Владимирович Иващенко**

доктор технических наук, профессор,  
директор Передовой медицинской  
инженерной школы,  
Самарский государственный  
медицинский университет  
(Россия, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)  
E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

#### **Anton V. Ivaschenko**

Doctor of technical sciences, professor,  
director of the Higher School  
of Medical Engineering,  
Samara State Medical University  
(89 Chapaevskaya street, Samara, Russia)

#### **Мargarita Владимировна Александрова**

аспирант,  
Самарский государственный  
медицинский университет  
(Россия, г. Самара, ул. Чапаевская, 89)  
E-mail: margarita.alexandrowa@mail.ru

#### **Margarita V. Aleksandrova**

Postgraduate student,  
Samara State Medical University  
(89 Chapaevskaya street, Samara, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 09.01.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 20.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 13.03.2023**

## РАСПОЗНАВАНИЕ МИКРОВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАССИФИКАТОРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

О. В. Мельник<sup>1</sup>, В. А. Саблина<sup>2</sup>, А. Д. Черненко<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина, Рязань, Россия

<sup>1</sup>omela111@yandex.ru, <sup>2</sup>sablina.v.a@evm.rsreu.ru, <sup>3</sup>anuta201294@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Задача автоматического распознавания микровыражений лица по последовательности изображений может быть решена с помощью вычислительных технологий, основанных на использовании методов и алгоритмов технического зрения. Точность результатов распознавания существенным образом зависит от выбора конкретных методов и алгоритмов, а также их параметров на каждом этапе используемой методики. Корректное распознавание микровыражений лица является ключевым фактором для решения задачи распознавания скрытых эмоций, испытываемых человеком. Микровыражения лица формируются на основе комбинации микродвижений лица. Целью работы является исследование зависимости точности обнаружения микродвижений лица от выбора параметров алгоритма вычисления дескрипторов признаков локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям LBP-TOP и метода машинного обучения для классификации векторов признаков. *Материалы и методы.* В качестве исходных данных используется набор последовательностей изображений спонтанных действий и микродвижений SAMM. Проведено исследование изменения точности обнаружения лицевых микродвижений для классификаторов на основе метода опорных векторов SVM и многослойного персептрона MLP при изменении параметров алгоритма LBP-TOP. *Результаты.* Установлено, что наилучшим результатом для классификатора на основе SVM является обнаружение с точностью 94 %, а для классификатора на основе MLP наилучшая точность обнаружения составила 98 %. Таким образом, в результате оптимального подбора параметров алгоритма LBP-TOP оба классификатора справляются с задачей обнаружения микродвижений лица. *Выводы.* Оба рассмотренных метода MLP и SVM показывают приемлемые результаты для решения задачи распознавания микровыражений лица с небольшим преимуществом MLP по сравнению с SVM.

**Ключевые слова:** распознавание микровыражений, обнаружение микродвижений, машинное обучение, скрытые эмоции, дескриптор признаков, локальные бинарные шаблоны по трем ортогональным плоскостям, классификаторы, метод опорных векторов, многослойный персептрон

**Для цитирования:** Мельник О. В., Саблина В. А., Черненко А. Д. Распознавание микровыражений лица с использованием классификаторов на основе методов машинного обучения // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 125–135. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-8

## FACIAL MICRO-EXPRESSION RECOGNITION USING CLASSIFIERS BASED ON MACHINE LEARNING METHODS

O.V. Melnik<sup>1</sup>, V.A. Sablina<sup>2</sup>, A.D. Chernenko<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Ryazan State Radio Engineering University  
named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

<sup>1</sup> omela111@yandex.ru, <sup>2</sup> sablina.v.a@evm.rsreu.ru, <sup>3</sup> anuta201294@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The problem of the automatic facial micro-expression recognition from the image sequence can be solved using technologies on the basis of computer vision methods and algorithms. At present, investigations of such technologies are carried out. However, the accuracy of the recognition results depends essentially on the selection of methods, algorithms, and also their parameters at each stage of the used technology. The correct facial micro-expression recognition is in turn the key factor to solve the problem of the recognition of the hidden emotions experienced by a human. Facial micro-expressions are generated on the basis of the combination of facial micro-movements. The research objective is the investigation of the facial micro-movement detection accuracy dependence on the selection of the Local Binary Patterns from Three Orthogonal Planes (LBP-TOP) feature descriptor algorithm parameters and machine learning method for the classification of the feature vectors. *Materials and methods.* The Spontaneous Actions and Micro-Movements (SAMM) dataset is used as the initial data. The study was made of changes in the accuracy of detection of facial micromovements for classifiers based on the SVM and multilayer perceptron MLP when changing the parameters of the LBP-TOP algorithm. *Results.* As a result of the study, it is ascertained that the best result for the SVM classifier is the 94 % detection accuracy, and the best detection accuracy for the MLP classifier is 98 %. Thus, because of optimal selection of algorithm parameters both classifiers could handle the problem of the facial micro-movement detection. *Conclusions.* The both considered methods MLP and SVM show acceptable results to solve the problem of the facial micro-expression recognition with a slight advantage of MLP in comparison with SVM.

**Keywords:** micro-expression recognition, micro-movement detection, machine learning, hidden emotions, feature descriptor, local binary patterns from three orthogonal planes, classifiers, support vector machine, multilayer perceptron

**For citation:** Melnik O.V., Sablina V.A., Chernenko A.D. Facial micro-expression recognition using classifiers based on machine learning methods. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(1):125–135. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-8

### Введение

Для понимания человеческих эмоций выражения лица играют важную роль наряду с речевыми интонациями (включая продолжительность молчания и вариации тона) и невербальными коммуникациями, такими как жесты рук и движения головы [1].

На основании психологических теорий [2] принято выделять шесть основных эмоций: удивление, страх, отвращение, гнев, радость и печаль. Иногда в качестве седьмой эмоции выделяют презрение [3]. Кроме того, есть много составных эмоций и переходов между эмоциями, которые требуют непрерывного анализа выражения лица. Исследование и анализ выражений лица используются для имитации и идентификации человеческих эмоций.

Выражения лица можно разделить на макровыражения и микровыражения [3]. Отличие состоит в том, что микровыражения длятся в течение менее половины секунды за счет их быстрого сознательного или бессознательного подавления, т.е. являются проявлениями скрытых эмоций человека.

Распознавание микровыражений непосредственно человеческим глазом – крайне сложная задача. Технически микровыражения можно уловить с помощью высокоскоростных камер, а их анализ намного сложнее, чем в случае макровыражений, ввиду небольшой продолжительности и неявной выраженности. Исследования в области анализа микровыражений представляют существенный интерес из-за открывающихся возможностей выявления подавляемых эмоций, что актуально во многих практических областях, от клинической психологии до криминалистики.

Методика автоматического распознавания микровыражений лица обычно включает три основных этапа [4]:

1. Обнаружение лица.
2. Извлечение информативных признаков.
3. Классификация выражений лица.

Обнаружение лица – это этап предварительной обработки для обнаружения или определения местоположения областей лица на входных изображениях [2].

На этапе извлечения информативных признаков наиболее широко [5, 6] используются следующие методы: трехмерной гистограммы направленных градиентов (3D Histograms of Oriented Gradients) 3DHOG, гистограммы направленного оптического потока (Histogram of Oriented Optical Flow) HOOF, вычисления дескрипторов признаков локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям (Local Binary Pattern-Three Orthogonal Planes) LBP-3OP.

Наиболее распространенными методами классификации, используемыми для распознавания выражения лица на последнем этапе, являются  $k$ -ближайших соседей, сопоставление шаблонов, скрытые марковские модели, алгоритмы Adaboost, метод опорных векторов и нейронные сети.

В последние годы набирает популярность использование для задачи распознавания микровыражений методов на основе глубокого обучения, в частности сверточных нейронных сетей [7, 8]. Однако возможности классических методов машинного обучения в рамках рассмотренного трехэтапного подхода остаются неисчерпанными и существуют пути повышения эффективности распознавания микровыражений за счет оптимизации выбора областей интереса на изображении и согласования информативных признаков, получаемых на выходе второго этапа, с используемым классификатором. При объединении в рамках единой методики методов глубокого обучения для поиска областей интереса на изображении, классических математических алгоритмов для извлечения информативных признаков и классификаторов на основе машинного обучения для обнаружения микродвижений лица процесс распознавания микровыражений является более открытой и управляемой исследователем процедурой, чем последовательное использование нейросетевых методов на каждом этапе.

В данной статье исследуется подход к оптимизации параметров алгоритма извлечения информативных признаков LBP-3OP при использовании

в качестве классификаторов многослойного перцептрона (Multilayer Perceptron) MLP и классификатора на базе метода опорных векторов (Support Vector Machine) SVM.

### *Материалы и методы*

*Метод опорных векторов.* SVM представляет собой набор связанных контролируемых методов обучения, используемых для классификации и регрессии. Данный классификатор принадлежит к семейству обобщенных линейных классификаторов. Другими словами, метод опорных векторов, или машина опорных векторов, – это инструмент классификации и прогнозирования регрессии, который использует теорию машинного обучения для максимальной точности прогнозирования, автоматически избегая чрезмерной подгонки к данным. Метод опорных векторов можно определить как систему, использующую пространство гипотез линейных функций в многомерном пространстве признаков, обученную с помощью алгоритма обучения теории оптимизации. Метод опорных векторов активно используется в исследованиях по машинному обучению во всем мире.

Функции ядра SVM используются для эффективного сопоставления входных данных, которые не могут быть линейно разделены в многомерном пространстве признаков, где затем могут применяться линейные методы. Чтобы выполнить классификацию с помощью линейного SVM, размеченный набор признаков  $\{X_i, Y_i\}$  составляется для всех  $r$  признаков в наборе обучающих данных. Класс признаков  $C_i$  определяется как  $Y_i = \{1, -1\}$ . Если предполагается, что данные линейно разделимы, SVM пытается найти разделяющую гиперплоскость с самым большим допуском. Допуск определяется как кратчайшее расстояние от разделяющей гиперплоскости до ближайшей точки данных [9].

SVM демонстрирует хорошую точность классификации даже при наличии небольшого количества обучающих данных, что делает его особенно подходящим для распознавания выражений в режиме реального времени. Выбор подходящей функции ядра позволяет дополнительно настроить и оптимизировать классификатор SVM для конкретной области распознавания выражений лица.

*Многослойный перцептрон.* MLP – одна из самых популярных топологий нейронных сетей, основанная на алгоритме обратного распространения ошибки. MLP можно рассматривать как классификатор логистической регрессии, в котором входные данные преобразуются с использованием нелинейного преобразования. Преобразование проецирует входные данные в пространство, где они становятся линейно разделимыми.

Промежуточный слой называется скрытым слоем. Одного скрытого слоя достаточно, чтобы сделать MLP в приближении универсальным. Однако использование большого количества скрытых слоев дает существенные преимущества и предпосылку к глубокому обучению. Одной из сложностей использования нейронных сетей MLP является определение оптимального количества скрытых нейронов перед процессом обучения. Фактически обычный способ определить количество скрытых единиц в нейронной сети MLP – это метод проб и ошибок. Альтернативой является использование конструктивных

алгоритмов [10], которые пытаются решить проблему путем построения архитектуры нейронной сети в процессе ее обучения. Все входные шаблоны обучаются один за другим, а затем разрабатывается структура системы обнаружения эмоций на основе нейронных сетей с прямой связью для обнаружения выражения эмоций. Сеть обучается с использованием вариантов алгоритма обратного распространения. Входные векторы подаются во входные модули, которые имеют линейные передаточные функции. Другие модули обычно имеют сигмоидную нелинейную функцию [11].

*Методика распознавания микровыражений лица.* Предлагаемая нами методика обнаружения микровыражений включает следующие этапы:

- загрузка видеопоследовательности;
- извлечение ключевых точек лица из каждого изображения последовательности;
- вычисление дескрипторов локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям;
- классификация.

Извлечение ключевых точек лица [12] для локализации областей интереса на изображении выполняется с помощью программного обеспечения MediaPipe, которое использует метод глубокого обучения для поиска антропометрических точек [13]. Для формирования предположений используется машинное обучение на основе библиотеки TensorFlow. Данный метод поиска антропометрических точек лица определяет 468 ключевых точек в трехмерной системе координат. Затем из данных найденных точек выбираются 62 наиболее значимых точки, которые могут быть задействованы в микролицевых движениях.

Следующим этапом является вычисление дескрипторов признаков локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям LBP-TOP. Вычисление проводится с использованием реализации алгоритма в MATLAB [14]. Алгоритм является настраиваемым, т.е. путем изменения таких входных параметров, как траектория расположения соседних точек вокруг центрального пикселя, количество соседних точек вокруг центральной точки, величина радиуса от центральной точки до соседних точек, коэффициенты перекрытия блоков между собой, коэффициенты деления блоков, возможно изменение точности обнаружения микродвижений лица классификаторами.

Завершающим этапом распознавания микровыражений лица является этап классификации, который выполнялся с помощью классификаторов SVM и MLP, точность распознавания эмоций которыми рассматривается в настоящей статье. Задача классификации состоит в определении, к какому классу движений относится рассматриваемое движение мышц лица, после чего по системе кодирования лицевых движений Facial Action Coding System (FACS) определяется возникшее микровыражение [3]. Данная задача является задачей обучения с учителем, в которой 80 % всех данных служат для обучения классификатора и оставшиеся 20 % используются для тестирования.

*Методика эксперимента.* Обобщенная схема методики проводимого эксперимента представлена на рис. 1.

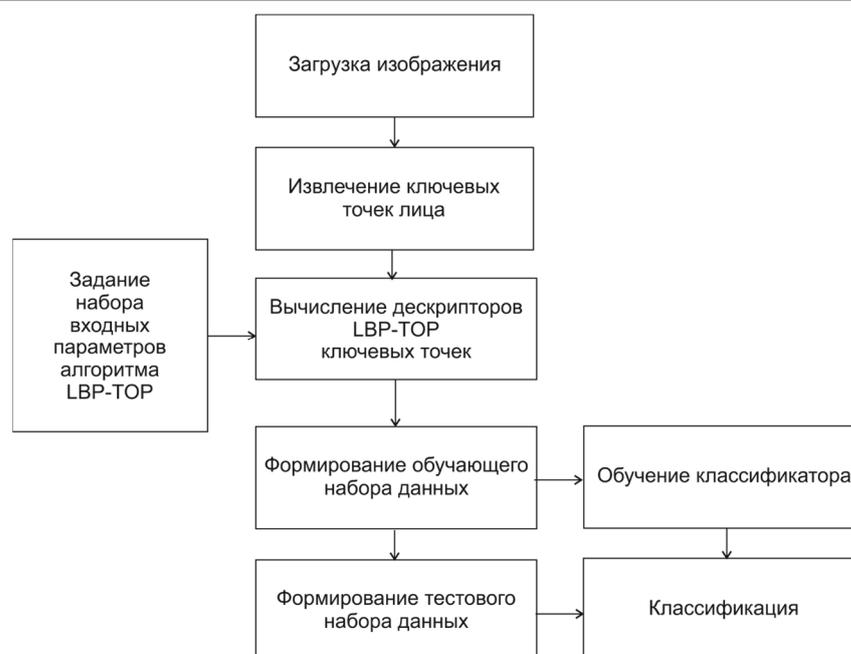


Рис. 1. Обобщенная схема методики эксперимента

В эксперименте проводилось исследование точности обнаружения лицевых микродвижений с помощью классификаторов на основе метода опорных векторов и многослойного персептрона при изменении параметров алгоритма дескрипторов локальных бинарных шаблонов по трем ортогональным плоскостям.

В качестве экспериментальных данных был использован набор данных спонтанных действий и микродвижений Spontaneous Actions and Micro-Movements (SAMM), содержащий наборы изображений, отображающих возникновение, пик и затухание всех универсальных микровыражений на лицах людей разных возрастов, пола, расы [15]. Полный набор содержит 159 последовательностей изображений, на каждой из которых представлено микровыражение, соответствующее одной из семи основных эмоций. К наборам изображений прилагается список соответствующих эмоций и комбинаций единиц движения Action Units (AUs) согласно FACS для всех последовательностей изображений. На основе этого списка и самих последовательностей изображений набор данных SAMM можно дополнительно разметить с точки зрения присутствия или отсутствия микролицевого движения в локальной области рассматриваемой антропометрической точки для получения обучающего и тестового наборов данных дескрипторов признаков.

Каждая область антропометрической точки из выбранных 62, в которых могут происходить микролицевые движения, для каждой из 159 последовательностей изображений описывается с помощью пространственно-временного дескриптора признаков LBP-TOP. Каждый такой дескриптор представляет собой вектор из 177 скалярных компонентов, описывающих трехмерную локальную область. Отсюда полный набор дескрипторов для набора SAMM составил  $62 \times 159 = 9858$  векторов признаков по 177 элементов в каждом. Непересекающиеся подмножества этих векторов использовались для формирования обучающего и тестового наборов для классификатора. В настоящей работе

производилась бинарная классификация, т.е. разделение на два класса: «антропометрическая точка вовлечена в микролицевое движение» или «антропометрическая точка не вовлечена в микролицевое движение или вовлечена в макровыражение» [14]. Тем самым макровыражения были отнесены к классу отсутствия микролицевых движений. Например, на некоторых последовательностях можно обнаружить моргание и поворот головы, которые не относятся к микролицевым движениям. Таким образом, в проведенном эксперименте выполнялось обнаружение наличия или отсутствия микролицевого движения в локальных областях антропометрических точек как наиболее трудоемкий в реализации этап распознавания микровыражений лица. Непосредственно распознавание классов эмоций на основе полученных результатов обнаружения микролицевых движений может в дальнейшем выполняться с использованием комбинаций AUs согласно FACS.

### *Результаты*

Для проведения экспериментов использовалась следующая конфигурация:

- Intel Core i5 1.7 GHz;
- 8 Gb DDR3 RAM;
- Windows 7;
- MATLAB R2020a.

В проведенных в настоящей работе экспериментах использовался не весь набор данных SAMM, а только размеченная заранее часть набора данных, которая составила около 30 % всего набора. Таким образом, для формирования обучающего и тестового наборов для классификатора использовались 3280 векторов признаков, которые были дополнительно разделены в соотношении 80 % для обучающего набора и 20 % для тестового набора. Примеры изображений из набора данных SAMM представлены на рис. 2.



Рис. 2. Примеры изображений из набора данных SAMM

В ходе экспериментов изменялись следующие параметры алгоритма LBP-TOP:

- коэффициенты расчета траектории расположения соседних точек для каждой из плоскостей;
- количество соседних точек вокруг центрального пикселя;
- расстояние от центрального пикселя до соседней точки;
- коэффициент перекрытия блоков между собой;
- коэффициенты деления блоков изображений на блоки меньшего размера.

Для обнаружения микролицевых движений в локальных областях антропометрических точек использовались классификаторы SVM и MLP.

Рассматривались варианты классификатора SVM со следующими типами функций ядра: линейная функция (Linear), радиально-базисная функция Radial Basis Function (RBF) и сигмоидальная функция (Sigmoid), а также рассматривались различные архитектуры классификатора MLP. Наилучшие результаты для этого классификатора были получены при пяти скрытых слоях. Обучение осуществлялось за 2000 эпох. На вход подается вектор признаков из 177 элементов, на выходе – булево значение, означающее наличие или отсутствие микролицевого движения в рассматриваемой области.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1 в процентах корректного обнаружения наличия или отсутствия микролицевых движений для тестового набора данных. Значения точности, представленные в таблице для различных вариантов параметров алгоритма LBP-TOP и различных модификаций классификаторов, вычислялись по формуле

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (1)$$

где  $TP$  – «True Positive», количество случаев корректного обнаружения наличия микролицевых движений;  $TN$  – «True Negative», количество случаев корректного обнаружения отсутствия микролицевых движений;  $FP$  – «False Positive», количество случаев ложного обнаружения наличия микролицевых движений при их фактическом отсутствии;  $FN$  – «False Negative», количество случаев ложного обнаружения отсутствия микролицевых движений при их фактическом наличии.

Таблица 1

Результаты экспериментов для различных параметров алгоритма LBP-TOP и классификаторов

Изменяемый параметр	SVM			MLP
	Linear	RBF	Sigmoid	
Коэффициенты расчета траектории расположения соседних точек для каждой из плоскостей	94	92	76	96
Количество соседних точек вокруг центрального пикселя	74	89	61	98
Расстояние от центрального пикселя до соседней точки	74	82	64	95
Изменение коэффициента перекрытия блоков между собой	90	91	50	98
Коэффициенты деления блоков изображений на блоки меньшего размера	88	90	67	96

### Обсуждение

На основе полученных результатов можно отметить, что для классификатора на основе метода опорных векторов SVM наилучшие результаты были получены при изменении параметров алгоритма LBP-TOP, определяющих траекторию расположения соседних точек вокруг центрального пикселя. Таким образом, наилучшим результатом для метода опорных векторов SVM является точное обнаружение 94 % микролицевых движений с применением линейной (Linear)

функции ядра классификатора. В то время как для классификатора на основе многослойного перцептрона MLP максимальная достигнутая точность обнаружения составляет 98 %. Таким образом, при корректном задании параметров алгоритма извлечения информативных признаков оба классификатора достаточно эффективно справляются с задачей обнаружения микролицевых движений.

### *Заключение*

В ходе экспериментальных исследований были найдены комбинации входных параметров алгоритма LBP-TOP, обеспечивающие наибольшее количество корректно обнаруженных микролицевых движений для рассмотренной выборки последовательностей изображений.

Полученные в ходе экспериментов результаты показывают, что изменение параметров алгоритма LBP-TOP позволяет выполнять обнаружение микролицевых движений лица с точностью до 98 % при использовании MLP в качестве классификатора. Это является лучшим показателем обнаружения микролицевых движений по сравнению с методом SVM, обеспечивающим точность до 94 % при изменении указанных параметров. Таким образом, оба метода, MLP и SVM, показывают приемлемые результаты для дальнейшего решения задачи классификации микровыражений лица с небольшим преимуществом MLP по сравнению с SVM.

### *Список литературы*

1. Fratarcangeli M. Computational Models for Animating 3D Virtual Faces. Linköping, Sweden, 2013. 128 p.
2. Chew S. W., Rana R., Lucey P. [et al.]. Sparse Temporal Representations for Facial Expression Recognition // *Advances in Image and Video Technology*. 2012. Vol. 7088. P. 311–322. doi:10.1007/978-3-642-25346-1\_28
3. Ekman P., Friesen W. Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement // *APA PsycTests*. 1978. doi:10.1037/t27734-000
4. Cootes T. F., Edwards G. J., Taylor C. Active Appearance Models // *IEEE Transactions Pattern Analysis Machine Intelligence*. 2001. Vol. 23, № 6. P. 681–685. doi:10.1109/34.927467
5. Merghani W., Davison A. K., Yap M. H. A Review on Facial Micro-Expressions Analysis: Datasets, Features and Metrics : preprint. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.02397.pdf> (дата обращения: 10.01.2023).
6. Pan H., Xie L., Wang Z. [et al.]. Review of Micro-Expression Spotting and Recognition // *Video Sequences, Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2021. Vol. 3. P. 1–17. doi:10.1016/j.vrih.2020.10.003
7. Liong S. T., Gan Y., See J. [et al.]. Shallow Triple Stream Three-dimensional CNN (STSTNet) for Micro-expression Recognition // *2019 14th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019)*. 2019. P. 1–5. doi:10.1109/FG.2019.8756567
8. Liu Y., Du H., Zheng L., Gedeon T. A Neural Micro-Expression Recognizer // *14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019)*. 2019. P. 1–4. doi:10.1109/FG.2019.8756567
9. Abrishami Moghaddam H., Ghayoumi H. Facial Image Feature Extraction Using Support Vector Machines // *Proceedings of the First International Conference on Computer Vision Theory and Applications (Setubal, Portugal, 2006)*. 2006. P. 480–485. doi:10.5220/0001363604800485
10. Boughrara H., Chtourou M., Ben Amar C., MLP Neural Network Based Face Recognition System Using Constructive Training algorithm // *International Conference on*

- Multimedia Computing and System (ICMCS). 2012. P. 233–238. doi:10.1109/ICMCS.2012.6320263
11. Boughrara H., Chtourou M., Ben Amar C., Chen L. Facial Expression Recognition Based on a MLP Neural Network Using Constructive Training Algorithm // *Multimedia Tools and Applications*. 2016. Vol. 75. P. 709–731. doi:10.1007/s11042-014-2322-6
  12. Мельник О. В., Саблина В. А., Савин А. В., Борщев А. Б. Обнаружение антропометрических точек лица на основе методов глубокого обучения с целью распознавания эмоций // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2020. № 3. С. 45–52. doi:10.18127/j15604136-202003-05
  13. Savin A. V., Sablina V. A., Nikiforov M. B. Comparison of Facial Landmark Detection Methods for Micro-Expressions Analysis // *10<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) : proceedings (Budva, Montenegro, 2021)*. 2021. P. 336–339. doi:10.1109/MECO52532.2021.9460191
  14. Burresti G., Sablina V. A., Micro-Facial Movement Detection Using LBP-TOP Descriptors for Landmark Based Regions // *10<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) : proceedings (Budva, Montenegro, 2021)*. 2021. P. 401–404. doi:10.1109/MECO52532.2021.9460142
  15. Davison A. K., Lansley C., Costen N. [et al.]. SAMM: A Spontaneous Micro-Facial Movement Dataset // *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2018. Vol. 9, № 1. P. 116–129. doi:10.1109/TAFFC.2016.2573832

### References

1. Fratarcangeli M. *Computational Models for Animating 3D Virtual Faces*. Linköping, Sweden, 2013:128.
2. Chew S.W., Rana R., Lucey P. et al. Sparse Temporal Representations for Facial Expression Recognition. *Advances in Image and Video Technology*. 2012;7088:311–322. doi:10.1007/978-3-642-25346-1\_28
3. Ekman P., Friesen W. Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement. *APA PsycTests*. 1978. doi:10.1037/t27734-000
4. Cootes T.F., Edwards G.J., Taylor C. Active Appearance Models. *IEEE Transactions Pattern Analysis Machine Intelligence*. 2001;23(6):681–685. doi:10.1109/34.927467
5. Merghani W., Davison A.K., Yap M.H. *A Review on Facial Micro-Expressions Analysis: Datasets, Features and Metrics: preprint*. 2018. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1805.02397.pdf> (accessed 10.01.2023).
6. Pan H., Xie L., Wang Z. et al. Review of Micro-Expression Spotting and Recognition. *Video Sequences, Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2021;3:1–17. doi:10.1016/j.vrih.2020.10.003
7. Liong S.T., Gan Y., See J. et al. Shallow Triple Stream Three-dimensional CNN (STSTNet) for Micro-expression Recognition. *2019 14th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019)*. 2019:1–5. doi:10.1109/FG.2019.8756567
8. Liu Y., Du H., Zheng L., Gedeon T. A Neural Micro-Expression Recognizer. *14th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019)*. 2019:1–4. doi:10.1109/FG.2019.8756567
9. Abrishami Moghaddam H., Ghayoumi H. Facial Image Feature Extraction Using Support Vector Machines. *Proceedings of the First International Conference on Computer Vision Theory and Applications (Setubal, Portugal, 2006)*. 2006:480–485. doi:10.5220/0001363604800485
10. Boughrara H., Chtourou M., Ben Amar C., MLP Neural Network Based Face Recognition System Using Constructive Training algorithm. *International Conference on Multimedia Computing and System (ICMCS)*. 2012:233–238. doi:10.1109/ICMCS.2012.6320263

11. Boughrara H., Chtourou M., Ben Amar C., Chen L. Facial Expression Recognition Based on a MLP Neural Network Using Constructive Training Algorithm. *Multimedia Tools and Applications*. 2016;75:709–731. doi:10.1007/s11042-014-2322-6
12. Mel'nik O.V., Sablina V.A., Savin A.V., Borshchev A.B. Detection of anthropometric facial points based on deep learning methods for the purpose of emotion recognition. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radioelectronics*. 2020;(3):45–52. (In Russ.). doi:10.18127/j15604136-202003-05
13. Savin A.V., Sablina V.A., Nikiforov M.B. Comparison of Facial Landmark Detection Methods for Micro-Expressions Analysis. *10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO): proceedings (Budva, Montenegro, 2021)*. 2021:336–339. doi:10.1109/MECO52532.2021.9460191
14. Burrese G., Sablina V.A., Micro-Facial Movement Detection Using LBP-TOP Descriptors for Landmark Based Regions. *10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO): proceedings (Budva, Montenegro, 2021)*. 2021:401–404. doi:10.1109/MECO52532.2021.9460142
15. Davison A.K., Lansley C., Costen N. et al. SAMM: A Spontaneous Micro-Facial Movement Dataset. *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2018;9(1):116–129. doi:10.1109/TAFFC.2016.2573832

### **Информация об авторах / Information about the authors**

#### **Ольга Владимировна Мельник**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры  
информационно-измерительной  
и биомедицинской техники,  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: omela111@yandex.ru

#### **Olga V. Melnik**

Doctor of technical sciences, associate  
professor, professor of the sub-department  
of information-measuring  
and biomedical engineering,  
Ryazan State Radio Engineering University  
named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

#### **Виктория Александровна Саблина**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электронных  
вычислительных машин,  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: sablina.v.a@evm.rsreu.ru

#### **Victoria A. Sablina**

Candidate of technical sciences, associate  
professor, associate professor  
of the sub-department  
of electronic computers,  
Ryazan State Radio Engineering University  
named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

#### **Анна Дмитриевна Черненко**

аспирант,  
Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина  
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)  
E-mail: anuta201294@yandex.ru

#### **Anna D. Chernenko**

Postgraduate student,  
Ryazan State Radio Engineering University  
named after V.F. Utkin  
(59/1 Gagarina street, Ryazan, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 01.02.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 06.03.2023**

**Принята к публикации/Accepted 13.03.2023**

## АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПАССАЖИРОВ

**А. Д. Столяров<sup>1</sup>, В. В. Гордеев<sup>2</sup>, В. И. Абрамов<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup> АЭРОЛАБС, Москва, Россия

<sup>1</sup> mr.alexst@gmail.com, <sup>2</sup> v.gordeev@aerolabs.aero, <sup>3</sup> viabramov@mephi.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В работе поднимается проблема выстраивания архитектуры программного обеспечения для первичной обработки данных о пассажирах авиакомпании, их структурирования и дальнейшей кластеризации с учетом отраслевой специфики. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи были изучены лучшие практики построения нагруженных систем работы с большими данными, выделены наиболее перспективные с точки зрения развития и взаимной интеграции. *Результаты.* Была успешно реализована на практике выбранная в результате работы архитектура построения системы кластеризации пассажиров, которая показала себя эффективной и надежной. *Выводы.* Описанный подход рекомендуется к применению как хорошо себя зарекомендовавший в работе с большими массивами отраслевых данных. Подход позволит гибко масштабировать систему обработки данных и подключать к ней в дальнейшем иные модули.

**Ключевые слова:** рекомендательные сервисы, кластеризация данных, машинное обучение, цифровая трансформация, цифровые технологии, структурирование данных, архитектура программного обеспечения

**Финансирование:** работа была выполнена при поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по договору (соглашению) № 147ГРЦТС10-D5/61890 о предоставлении гранта на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

**Для цитирования:** Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И. Архитектура системы кластеризации пассажиров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 136–148. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-9

## ARCHITECTURE OF THE PASSENGER CLUSTERING SYSTEM

**A.D. Stolyarov<sup>1</sup>, V.V. Gordeev<sup>2</sup>, V.I. Abramov<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup> National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Aerolabs LLC, Moscow, Russia

<sup>1</sup> mr.alexst@gmail.com, <sup>2</sup> v.gordeev@aerolabs.aero, <sup>3</sup> viabramov@mephi.ru

**Abstract.** *Background.* The paper raises the problem of building a software architecture for the primary processing of airline passenger data, data structuring and further clustering, taking into account industry specifics. *Materials and methods.* To solve this problem, the best practices of building loaded systems for working with big data were studied, the most promising from the point of view of development and mutual integration were identified. *Results.*

The architecture of the passenger clustering system chosen as a result of the work was successfully implemented in practice and proved to be effective and reliable. *Conclusions.* The described approach is recommended for use as well-proven in working with large arrays of industrial data. The approach will allow flexible scaling of the data processing system and connection of other modules to it in the future.

**Keywords:** recommendation services, data clustering, machine learning, digital transformation, digital technologies, data structuring, software architecture

**Acknowledgments:** the work was carried out with the support of the Federal State Budgetary Institution "Fund for Assistance to the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere" under contract (agreement) № 147GRTS10-D5/61890 on the provision of a grant for research and development work.

**For citation:** Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I. Architecture of the passenger clustering system. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(1):136–148. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-9

### ***Введение***

В условиях ВANI-мира (акроним от английских слов: хрупкий, тревожный, нелинейный и непонятный), сложившихся в результате развития Индустрии 4.0, и становления шестого технологического уклада требуются новые подходы к управлению компаниями, основанные на активном использовании новых бизнес-моделей и цифровых технологий. Антироссийские санкции внесли дополнительную неопределенность в развитие событий, и для России в сложившихся геополитических условиях и особенно при возрастающем санкционном давлении проведение политики импортозамещения должно быть направлено на развитие экономической деятельности и повышение инновационной активности предприятий [1]. Задача цифровой трансформации экономики и увеличения темпов экономического развития страны актуальна как никогда, поэтому требуются иные подходы к управлению с использованием инновационных цифровых технологий, дающих новые способы наращивания эффективности работы предприятий. Важным условием и фактором успешного проведения цифровой трансформации является повышение цифровой зрелости, которое выражается в степени готовности предприятия к запланированным переменам [2].

Показано, что стратегическая задача цифровой трансформации компании заключается в построении практически жизнеспособного цифрового двойника, который будет описывать взаимосвязь между цифровыми активами и видами деятельности, моделируя взаимодействие между различными источниками данных в организации [3]. Разработка рекомендательной системы для повышения эффективности работы с клиентами является важным этапом при цифровизации бизнес-процессов компании. Анализ данных, которыми располагает авиакомпания, и кластеризация клиентов на основе этих данных позволяет получить богатый «маркетинговый» портрет пользователя и сформировать уникальную рекомендательную систему, потенциально способную значительно увеличить объем продаж дополнительных сервисов самого авиаперевозчика и его партнеров. В связи с этим актуальна задача превращения большого объема неструктурированных данных в потенциально обозримый набор кластеров, значимых с точки зрения потребительских характеристик, входящих в них клиентов. Наиболее релевантными подходами для решения данной

задачи являются методы машинного обучения, а именно семейство методов обучения без учителя. Подобные методы широко используются в задачах, не имеющих четкой разметки данных и требующих поиска закономерностей в больших объемах данных. Для успешной реализации системы кластеризации пассажиров необходима разработка хранилища данных и системы резервирования данных.

### *Материалы и методы*

Основной задачей системы кластеризации является формирование на основе предоставленных данных групп пользователей, значимых с точки зрения потребительских характеристик, входящих в них клиентов. Разработанная система кластеризации, реализованная в виде отдельного модуля, является первым блоком в создании комплексного продукта и для полноценной работы будет требовать дополнительных данных из разрабатываемых на следующих этапах систем. Для этого на текущем этапе разработки система кластеризации должна обладать архитектурой, которая бы позволила с легкостью ее в будущем интегрировать с другими модулями программного обеспечения, поэтому решено было ее исполнить в виде серверного приложения, наполняющего свою БД с использованием данных, полученных с других серверов в текстовом виде.

Используемые для кластеризации данные по умолчанию не структурированы и не полны, ввиду чего требуется их предварительная обработка и структурирование. Эти функции выполняет дополнительно разработанное серверное приложение. Приложения подобного класса принято называть «парсерами» (от англ. parser – «анализатор»). Парсер, используя данные, полученные с удаленного сервера, структурирует и связывает их, после чего записывает в базу данных.

Записанные в базу структурированные данные уже поступают на вход непосредственно модуля кластеризации, выполняющего поиск оптимального их разбиения. Схематичное представление описанной структуры изображено на рис. 1.

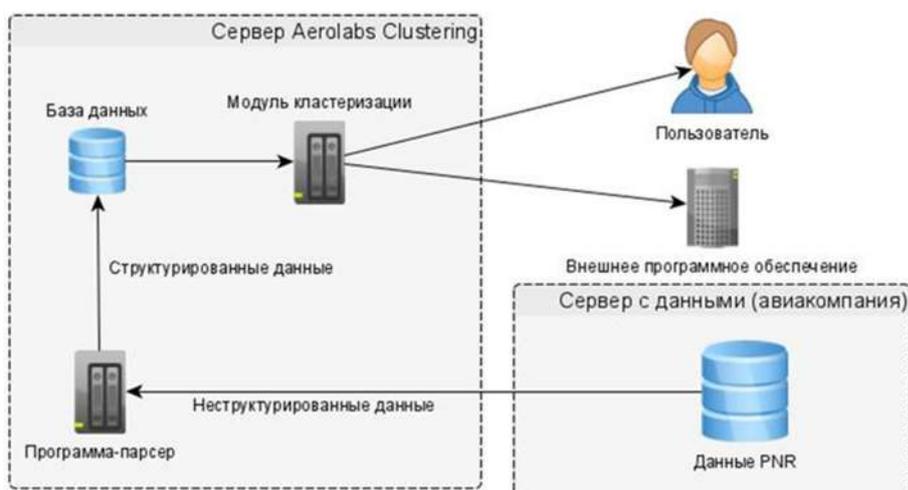


Рис. 1. Место модуля кластеризации в программном обеспечении

В качестве основного метода кластеризации использовался метод К-средних. Для определения оптимального количества кластеров использовался «метод локтя» с автоматизированным подбором оптимального количества кластеров, который осуществлялся по следующему алгоритму:

- последовательное разбиение массива данных на кластеры от 1 до 20;
- расчет на каждом шаге внутрикластерной суммы квадратов остатков (WCSS);
- построение графика («локтя»), где по оси абсцисс откладывалось число кластеров, а по оси ординат – WCSS;
- строилась касательная к графику, проходящая под углом  $135^\circ$ , определялась координата точки касания по оси абсцисс;
- в качестве оптимальных бралось число кластеров, равное ближайшим целым числам справа и слева от полученной координаты.

Полученные количества кластеров далее проверялись на предмет качества кластеризации с помощью ключевых метрик:

- наполненность кластеров – не менее 10 % (не должно быть кластеров, в которые вошло бы менее 10 % совокупности);
- четкость кластеров не менее 0,8 (отношение пограничных точек к общему количеству точек);
- устойчивость кластеров не менее 0,9, вычисляемая методом Кауфмана.

В случае если ни одна из двух взятых значений кластеров не проходила проверку по данным критериям, брались следующие по удаленности числа кластеров.

В литературе применительно к кластеризации клиентов встречаются различные подходы к кластеризации. Множество работ посвящено не столько алгоритмам кластеризации, сколько выявлению релевантных и технических параметров для дальнейшей логической сегментации. Нас же интересуют работы, связанные именно с методологией кластеризации в маркетинговой сфере. Так, описан подход из близкой к нам сферы кластеризации участников программы лояльности [4]. В данном подходе не используются автоматизированные средства и выполняется скорее сегментация клиентской базы на основе формальных правил, что не применимо для обучающихся рекомендательных систем. Больше всего работ по кластеризации клиентов посвящено банковскому сектору. В найденных работах для кластеризации применяется также алгоритм K-means [5, 6], однако в данных подходах не применяется автоматизированный подбор количества кластеров, равно как не разрабатываются критерии качества кластеризации, из-за чего они ограничиваются только ручным применением. Для кластеризации применяется также метод DBSCAN [6] с аналогичными методическими недостатками, результаты кластеризации которого на практике не уступают методу K-means. Применяются для кластеризации клиентских баз карты Кохонена [7]. Данный метод нами тоже исследовался, однако дал распределение данных по кластерам близкое к случайному. Это объясняется тем, что карты Кохонена предназначены прежде всего для работы с количественными данными, тогда как множество данных о пассажирах авиакомпании являются качественными.

Ключевая новизна метода заключается в том, что он позволяет автоматизировано проводить перекластеризацию данных без участия пользователя. Так как клиентская база растет и обогащается новыми транзакциями и в том числе данными по уже существующим в ней пользователям, разбиение клиентов на кластеры делается ежедневно, что оптимально достижимо с разработанным подходом. При этом используемые методы достаточно просты с точки зрения проводимых вычислений и не создают большой нагрузки на оборудование. Кластеризация, как правило, используется для исследования аналитиком существующего набора данных, и поэтому необходимость проведения регулярной кластеризации обновляемого набора данных достаточно редка. Однако для автоматизации кластеризации существуют определенные подходы, например на основе карт Кохонена [8], которые, как уже было сказано, в нашем случае (небольшое число количественных параметров) слабо применимы. В подавляющем же количестве случаев задача автоматизации кластеризации применяется для работы с текстовой информацией (документами) [9–14]. Однако подходов, которые были бы применимы для автоматизированной кластеризации в целях маркетинга, найдено не было.

### *Результаты и обсуждение*

Система была разработана на основе библиотеки машинного обучения Scikit-learn на языке Python. Некоторые алгоритмы написаны на Cython для повышения производительности [15]. Scikit-learn хорошо интегрируется со многими другими библиотеками Python, такими как matplotlib и plotly для построения графиков и представлении визуализации, numpy для векторизации массивов, pandas dataframes, scipy и др. [16]. Первым делом требуется обработка данных, поступающих из базы данных с помощью SQL-запросов. Это возможно благодаря использованию библиотеки sqlalchemy, которая открывает данную возможность [17].

Далее для стандартизации (представлении в числовом формате) и нормализации (расположении численных значений в диапазоне от 0 до 1) данных использовался пакет «preprocessing» библиотеки Scikit-learn, которая уже имеет реализованные тесты, обрабатывающие информацию о процессах работы реализованных методов<sup>1</sup>. Благодаря этому возможно детектировать неточности в работе алгоритмов, а также выявлять ошибки.

Сама кластеризация реализована с использованием пакета K-means, которая включает в себя полное тестирование работы одноименного итерационного алгоритма кластеризации. Отслеживается качественное содержание батчей (набора данных, передаваемых для присвоения кластеров), а также этапы миграции центров кластеров и количество проведенных итераций для достижения оптимальных центров кластеров [18].

Основываясь на формате входных данных, была разработана следующая инфологическая модель данных, содержащая три основных аспекта – бронирование, пассажир, рейс (рис. 2).

<sup>1</sup> Документация к Scikit Learn: Preprocessing data. URL: <https://scikit-learn/stable/modules/preprocessing.html> (дата обращения: 12.09.2022).



Рис. 2. Инфологическая модель данных

Ввиду наличия ряда стандартного вида связей (one-to-many, many-to-many) и необходимости учитывать их при выборках данных в качестве типа хранилища данных была выбрана реляционная база данных.

Задача серверной части – формирование базы данных и структурирование информации и обеспечения к ней доступа по REST API (от англ. Application Programming Interface – «программный интерфейс приложения»). API представляет собой описание способов, используя которые, одна компьютерная программа может взаимодействовать с другой. REST (от англ. Representational State Transfer – «передача состояния представления») – наиболее популярный и признанный во всем мире подход к проектированию взаимодействия распределенных приложений в сети Интернет. Для внедрения данного подхода обязательно выполнение следующих принципов [19]:

- клиент-серверная модель;
- разграничение состояний (состояния, относящиеся к клиенту хранятся на стороне клиента);
- кэширование (сохранение ответов на запросы у клиента);
- многослойность (возможность добавления в систему посредников, выполняющих разные функции);
- код по запросу (некоторые приложения могут скачиваться и выполняться на стороне клиента для снижения нагрузки на сервер).

В качестве основного языка разработки серверной части выбран Python ввиду популярности, высокоуровневости и наличия большого количества библиотек.

Поскольку само по себе создание веб-сервера с REST API на Python является стандартной задачей, была использована хорошо зарекомендовавшаяся

себя связка flask (фреймворк) – gunicorn (веб-сервер) – nginx (прокси) [20]. Взаимодействие фреймворка и веб-сервера происходит по протоколу WSGI, обеспечивающему унификацию интерфейсов фреймворков и веб-серверов и позволяющему распараллеливать запросы, доверяя их обработку предварительно созданным процессам-работчим. Фреймворк flask, в свою очередь, был выбран, с одной стороны, из-за простоты создания прототипа приложения, с другой – в связи с обилием возможностей по расширению функционала с использованием множества внешних модулей при необходимости.

В качестве СУБД выбрана PostgreSQL ввиду ее высокой производительности и богатства функционала и расширений [21]. Система развернута в сервисе Amazon Web Services (AWS), на машине конфигурации t2.micro (1 виртуальное ядро, 1 ГБ ОЗУ). ОС – Red Hat Enterprise Linux 8. База данных развернута в RDS.

Для удобства работы с данными используется ORM (англ. Object-Relational Mapping, объектно-реляционное отображение) SQLAlchemy. Она представляет собой слой абстракции, позволяющий сосредоточиться на логике обработки данных, а не на правильном построении SQL-запросов – как правило, запросы типичны и повторяют друг друга, а для особых случаев, например когда необходимо особое связывание, join, таблиц, без которого работа алгоритма замедлится в сотни раз, всегда можно задать особые правила построения запроса [22].

Для надежности отслеживания и применения миграций (изменения структуры) БД используется инструмент Alembic. Он позволяет вести контроль всех изменений структуры БД и применять эти изменения. При этом Alembic позволяет генерировать широкий спектр типов миграций прямо из изменений кода объектов ORM [23].

Данный набор технологий позволит эффективно хранить данные в базе данных и обеспечивать оптимальную обработку поступающих на сервер запросов. Созданная структура также позволит гибко дорабатывать и далее масштабировать разработанное программное обеспечение.

Вторым аспектом разработки является преобразование данных, получаемых от клиентов в формат, соответствующий архитектуре.

В результате анализа информационных баз данных клиентов-авиакомпаний было принято решение остановиться на информации, содержащейся в записях о PNR (Passenger Name Record). PNR представляют собой записи о маршруте пассажира или группы пассажиров и содержат полные данные о бронировании, включая класс полета, данные о питании и т.д.

Записи PNR жестко регламентированы отраслевым стандартом Advance Passenger Information (API) Guidelines<sup>1</sup>, разработанным и поддерживаемым:

- Международной ассоциацией воздушного транспорта (IATA);
- Международной организацией гражданской авиации (ICAO);
- Всемирной таможенной организацией (WCO).

Данный стандарт унифицирует передаваемые авиакомпаниями сообщения о PNR, обеспечивая взаимную интегрированность всех CRS систем (Computer Reservation System).

<sup>1</sup> Guidelines on advance passenger information (API) / WCO/IATA/ICAO. 2014.

Данные поступают на вход в виде наборов текстовых файлов – по одному файлу каждого типа для каждого дня. Название всех файлов стандартное и может быть записано маской PNR\_A\_BC.txt, где:

- PNR – постоянно присутствующая в имени всех файлов часть, относящая их к данным PNR;
- A – сюда подставляется код авиалиний;
- B – дата, записи которой содержит данный файл в формате ГГГГММДД (без пробелов);
- C – код, характеризующий тип данных, содержащихся в файле. Пишется слитно с датой без пробела.

Таким образом, например, файл, содержащий информацию о пассажирах на дату 01.02.2016, имеет имя «PNR\_9U\_20160201PAX.TXT».

Файлы, относящиеся к одному типу данных, всегда имеют одинаковую структуру данных. В качестве основных используются следующие файлы данных (код «С»):

- PAX – файл, содержащий базовую информацию о пассажирах – о группе в одной брони (поле «PAX\_NMBR»), фамилию/имя с указанием пола или статус «ребенок» (PAX\_NAME);
- SSRS – файл, содержащий дополнительную информацию, связанную с билетами пассажиров;
- RES – файл, содержащий информацию о бронированиях. Ключевой интересующей нас характеристикой является BOOKING\_CITY\_CD – город, в котором приобретен билет (либо регион сайта-агента);
- RES\_CONTACTS – файл, содержащий контактную информацию пассажиров – номер телефона (Н) и e-mail (Е). Особенностью этих данных является то, что они зачастую могут быть заполнены турагентом неверно или заполнены контактами самого турагента, поэтому не всегда могут быть использованы для надежной идентификации записей;
- RES\_INF\_TKT – файл, содержащий информацию о младенцах на рейсе. Информация важна тем, что пассажиру с младенцем, скорее всего, понадобится, например, такая услуга, как такси с детским креслом;
- RES\_LEGS – файл, содержащий информацию о «плечах», т.е. единичных перелетах в составе маршрута. Кроме данных о самих перелетах (время и места вылета/прилета) данный файл содержит важную информацию относительно класса бронирования – эконом/бизнес;
- FARE\_QUOTE – файл, содержащий качественную информацию о билетах, включая их стоимость;
- HISTORY\_LEGS – файл, содержащий информацию о предыдущих полетах;
- PAX\_SEATS – файл, содержащий места, на которые приобретены билеты;
- PAX\_SERVICES – файл, содержащий информацию о дополнительных сервисах.

Всего в дневной выгрузке присутствует 21 тип файлов PNR, но перечисленные выше для наших целей являются основными.

Данные из всех таблиц были увязаны между собой, для чего использовалось поле PNR, которое являлось ID брони, а в некоторых случаях дополнительно имена пассажиров в формате «ФАМИЛИЯ/ИМЯ (ОБРАЩЕНИЕ)».

В итоге разработанная структура базы данных имеет вид, представленный на рис. 3.

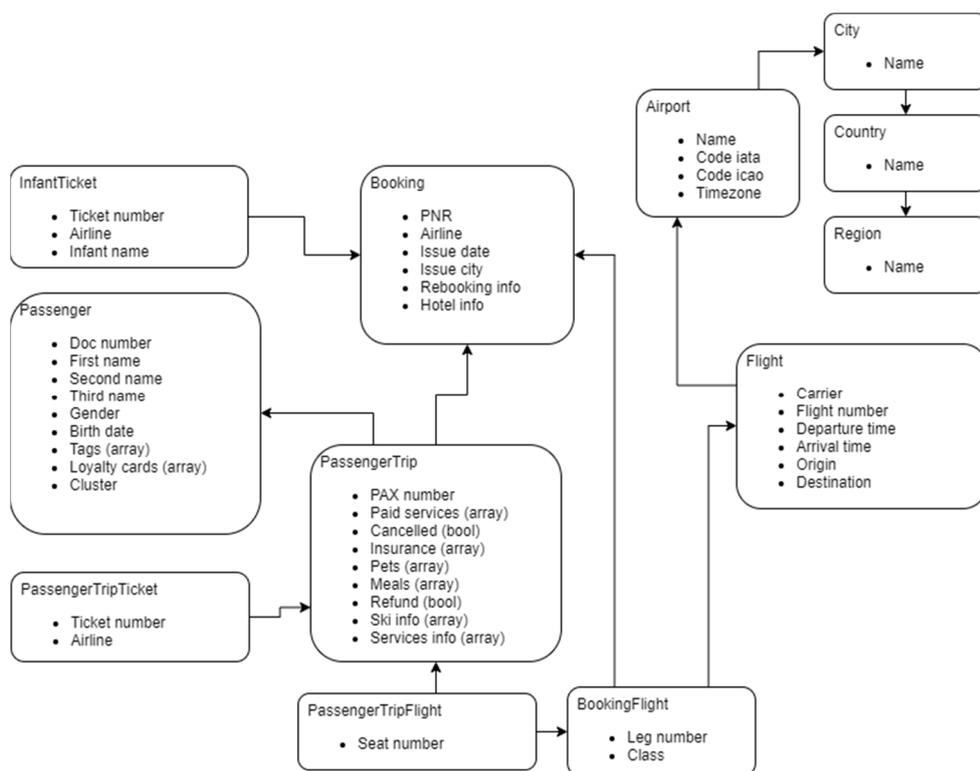


Рис. 3. Структура данных системы кластеризации

Очевидно, центральной моделью данных является пассажир (модель Passenger) – его характеристики вычисляются путем обработки относящихся к нему бронирований и всего, что с ними связано. Две другие «корневые» (ни на что не ссылающиеся) модели – это Booking (бронирование, уникально характеризуется по совокупности PNR и имени авиакомпании) и Flight (рейс, уникально характеризуется по авиакомпании, номеру рейса и дате вылета). Просто так связать пассажира и бронирование нельзя – в брони может быть несколько человек, поэтому вводится модель PassengerTrip, которая указывает на пассажира в брони (PNR + PAX\_NMBR). Рейс связывается с бронированием через модель BookingFlight (PNR + LEG\_NMBR), и в конце концов PassengerTrip связывается с BookingFlight через PassengerTripFlight (PNR + PAX\_NMBR + LEG\_NMBR). Билеты привязываются к PassengerTrip или к Booking.

В процессе обработки данных также была обнаружена проблема с наполнением PAX\_SEATS – файла, который содержит информацию о местах пассажиров. Хотя эти файлы почти всегда присутствуют, записей в них крайне мало – иногда на порядок меньше, чем в других файлах, поэтому было принято решение связывать BookingFlight и PassengerTrip записями-заглушками (имеющими ссылки на другие записи, но не имеющими информации в своем теле) при отсутствии данных для заполнения «правильного» PassengerTripFlight.

В результате проведенной кластеризации в качестве оптимальных разбиений, соответствующих заданным формальным критериям, были разбиения на четыре и на пять кластеров. По завершении кластеризации осуществлялась также формально-логическая проверка данных, включенных в кластеры на предмет наличия в них неких определяющих данные кластеры признаков. В разбиении на пять кластеров таких признаков обнаружено не было – кластеры внешне были похожи на случайное распределение, поэтому в качестве оптимального было выбрано разбиение на четыре кластера. Данное разбиение характеризовалось следующими ключевыми метриками:

- наполненность кластеров более 20 %;
- коэффициент четкости 0,82;
- устойчивость кластеров 0,91.

Разработанная система кластеризации тестировалась в составе программного обеспечения для генерации персональных предложений. Разработанная архитектура позволила успешно интегрировать систему кластеризации с иными модулями программного обеспечения. Тестирование скорости работы системы кластеризации не проводилось, так как она работает асинхронно с другими модулями и по расписанию, не вызывая задержек в работе других модулей программного обеспечения. Отсутствие задержек в работе говорит об оптимальной скорости работы системы кластеризации.

### *Заключение*

В результате проведенных исследований была реализована и испытана архитектура, предлагаемая для реализации промышленного программного обеспечения для структурирования, обработки и кластеризации данных пассажиров авиакомпаний. Используемая архитектура позволяет программному обеспечению данные о пассажирах из PNR-записей, формируемых внутренними системами авиакомпании в текстовом виде, преобразовывать в структурированную базу данных, позволяющую выполнять дальнейшую обработку штатными методами. Разработанная архитектура позволяет работать с большими объемами данных (стандартная дневная выгрузка составляет несколько гигабайт текстовых записей), позволяя гибко масштабировать нагрузку. Описанное решение может выступать как самостоятельное программное обеспечение для предварительной обработки данных, а также работать в составе комплекса программных модулей, обеспечивая структурирование входящего потока информации.

Реализованная с помощью разработанного программного обеспечения архитектура дала соответствующее всем заданным критериям разбиение данных на четыре кластера.

### *Список литературы*

1. Абрамов В. И., Маркина Ю. В., Камынин Д. А. Реализация политики импортозамещения как фактор активизации инновационных процессов // Экономика и предпринимательство. 2017. № 12-1. С. 134–137.
2. Абрамов В. И., Борзов А. В., Семенов К. Ю. Оценка готовности малых и средних предприятий к цифровой трансформации // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12, № 3. doi:10.18334/vinec.12.3.115000

3. Абрамов В. И., Бобоев Д. С., Гильманов Т. Д., Семенов К. Ю. Теоретические и практические аспекты создания цифрового двойника компании // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12, № 2. С. 967–980. doi:10.18334/voprosy.12.2.114890
4. Белоцерковская М. Г. Кластеризация клиентской базы участников программы лояльности // Московский экономический журнал. 2017. № 2. С. 112–119.
5. Задворная И. А., Ромакина О. М. Применение алгоритма «кластеризация» для анализа данных потенциальных клиентов банка // Ученые записки Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 7–15.
6. Кудашкин А. В., Мохов А. С. Кластеризация клиентов банка на основе их персональных данных и банковских транзакций // Информационные системы и технологии ИСТ-2020. 2020. С. 780–785.
7. Ляховец А. В. Кластеризация с помощью нейронной сети Кохонена и модифицированного алгоритма иерархической кластеризации Хамелеон в различных предметных областях // Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2013.
8. Сеньковская И. С., Сараев П. В. Автоматическая кластеризация в анализе данных на основе самоорганизующихся карт Кохонена // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2011. № 2. С. 78–79.
9. Серебряная Л. В., Чебаков С. В. Методы автоматической классификации и кластеризации текстовой информации // Информатизация образования. 2011. № 2. С. 52–61.
10. Киселев М. Метод кластеризации текстов, основанный на попарной близости термов, характеризующих тексты, и его сравнение с метрическими методами кластеризации // Интернет-математика. 2007. С. 74–83.
11. Киселев М. В., Пивоваров В. С., Шмулевич М. М. Метод кластеризации текстов, учитывающий совместную встречаемость ключевых терминов, и его применение к анализу тематической структуры новостного потока, а также ее динамики // Интернет-математика. 2005. С. 412–435.
12. Кушнарев Д. А. Классификация алгоритмов кластеризации текстовых документов // Карповские научные чтения : сб. науч. ст. Вып. 5 : в 2 ч. Ч. 1 / под ред. А. И. Головня. Минск : Белорусский Дом печати, 2011. С. 179–183.
13. Кан А. В., Козловская Я. Д., Кадушкин Н. А., Хорошилов А. А. Автоматическая кластеризация документов СМИ на основе анализа их смыслового содержания // Моделирование и анализ данных. 2020. Т. 10, № 3. С. 24–38.
14. Сажок Н. Н. Кластеризация слов при построении лингвистической модели для автоматического распознавания речевого сигнала // Кибернетика и вычислительная техника. 2012. № 4. С. 59–66.
15. Сравнительный анализ эффективности работы Cython и Python. URL: <https://habr.com/ru/post/676426/?ysclid=l8mq7cv0zb688214357> (дата обращения: 12.09.2022).
16. Рашка С., Мирджалили В. Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow 2 : пер. с англ. 3-е изд. СПб. : Диалектика, 2020. 848 с.
17. Myers J., Copeland R. Essential SQLAlchemy: Mapping Python to Databases. O'Reilly Media, Inc., 2015.
18. Wu B. K. K-means clustering algorithm and Python implementation // IEEE International Conference on Computer Science, Artificial Intelligence and Electronic Engineering (CSAIEE). 2021. P. 55–59.
19. Masse M. REST API Design Rulebook. 1st ed. Beijing Köln : O'Reilly Media, 2011. 112 p.
20. Relan K. Deploying Flask Applications // Building REST APIs with Flask: Create Python Web Services with MySQL. Berkeley, CA : Apress, 2019. P. 159–182.
21. Jung M.-G., Youn S.-A., Bae J., Choi Y.-L. A study on data input and output performance comparison of mongodb and postgresql in the big data environment // 8th international conference on database theory and application (DTA). 2015. P. 14–17.

22. Fredstam M., Johansson G. Comparing database management systems with SQLAlchemy: A quantitative study on database management systems. 2019.
23. Holt B., Briggs P., Ceze L., Oskin M. Alembic: automatic locality extraction via migration // Proceedings of the 2014 ACM International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications. 2014. P. 879–894.

### *References*

1. Abramov V.I., Markina Yu.V., Kamynin D.A. Implementation of import substitution policy as a factor of activation of innovation processes. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economics and entrepreneurship*. 2017;(12-1):134–137. (In Russ.)
2. Abramov V.I., Borzov A.V., Semenov K.Yu. Assessment of readiness of small and medium-sized enterprises for digital transformation. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki = Issues of innovative economy*. 2022;12(3). (In Russ.). doi:10.18334/vinec.12.3.115000
3. Abramov V.I., Boboev D.S., Gil'manov T.D., Semenov K.Yu. Theoretical and practical aspects of creating a digital double of the company. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki = Issues of innovative economy*. 2022;12(2):967–980. (In Russ.). doi:10.18334/vinec.12.2.114890
4. Belotserkovskaya M.G. Clustering of the customer base of loyalty program participants. *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal = Moscow Economic Journal*. 2017;(2):112–119. (In Russ.)
5. Zadornaya I.A., Romakina O.M. Application of the clusterization algorithm for analyzing data of potential bank customers. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific notes of the Bryansk State University*. 2019;(2):7–15. (In Russ.)
6. Kudashkin A.V., Mokhov A.S. Clusterization of bank customers based on their personal data and bank transactions. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii IST-2020 = Information systems and technologies IST-2020*. 2020:780–785. (In Russ.)
7. Lyakhovets A.B. Clusterization using the Kohonen neural network and the modified algorithm of hierarchical clustering Chameleon in various subject areas. *Reestratsiya, zberigannya i obrobka danikh*. 2013. (In Russ.)
8. Sen'kovskaya I.S., Saraev P.V. Automatic clustering in data analysis based on self-organizing Kohonen maps. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov*. 2011;(2):78–79. (In Russ.)
9. Serebryanaya L.V., Chebakov S.V. Methods of automatic classification and clustering of textual information. *Informatizatsiya obrazovaniya = Informatization of education*. 2011;(2):52–61. (In Russ.)
10. Kiselev M. A text clustering method based on pairwise proximity of terms characterizing texts and its comparison with metric clustering methods. *Internet-matematika = Internet mathematics*. 2007:74–83. (In Russ.)
11. Kiselev M.V., Pivovarov V.S., Shmulevich M.M. The method of clustering texts, taking into account the joint occurrence of key terms, and its application to the analysis of the thematic structure of the news stream, as well as its dynamics. *Internet-matematika = Internet mathematics*. 2005:412–435. (In Russ.)
12. Kushnarev D.A. Classification of clustering algorithms of text documents. *Karpovskie nauchnye chteniya: sb. nauch. st. Vyp. 5: v 2 ch. Ch. 1 = Karpov scientific readings : collection of scientific articles. Iss. 5 : in 2 parts. Part 1*. Minsk: Belorusskiy Dom pechati, 2011:179–183. (In Russ.)
13. Kan A.V., Kozlovskaya Ya.D., Kadushkin N.A., Khoroshilov A.A. Automatic clustering of media documents based on the analysis of their semantic content. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modeling and data analysis*. 2020;10(3):24–38. (In Russ.)
14. Sazhok N.N. Clustering of words in the construction of a linguistic model for automatic speech signal recognition. *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika = Cybernetics and computer engineering*. 2012;(4):59–66. (In Russ.)

15. *Sravnitel'nyy analiz effektivnosti raboty Cython i Python = Comparative analysis of the effectiveness of Cython and Python.* (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/post/676426/?ysclid=18mq7cv0zb688214357> (accessed 12.09.2022).
16. Rashka S., Mirdzhalili V. *Python i mashinnoe obuchenie: mashinnoe i glubokoe obuchenie s ispol'zovaniem Python, scikit-learn i TensorFlow 2 : per. s angl. 3-e izd. = Python and machine learning: machine and deep learning using Python, scikit-learn and TensorFlow 2 : trans. from English 3rd ed.* Saint Petersburg: Dialektika, 2020:848. (In Russ.)
17. Myers J., Copeland R. *Essential SQLAlchemy: Mapping Python to Databases.* O'Reilly Media, Inc., 2015.
18. Wu B.K. K-means clustering algorithm and Python implementation. *IEEE International Conference on Computer Science, Artificial Intelligence and Electronic Engineering (CSAIEE).* 2021:55–59.
19. Masse M. *REST API Design Rulebook. 1st ed.* Beijing Köln: O'Reilly Media, 2011:112.
20. Relan K. Deploying Flask Applications. *Building REST APIs with Flask: Create Python Web Services with MySQL.* Berkeley, CA: Apress, 2019:159–182.
21. Jung M.-G., Youn S.-A., Bae J., Choi Y.-L. A study on data input and output performance comparison of mongodb and postgresql in the big data environment. *8th international conference on database theory and application (DTA).* 2015:14–17.
22. Fredstam M., Johansson G. *Comparing database management systems with SQLAlchemy: A quantitative study on database management systems.* 2019.
23. Holt B., Briggs P., Ceze L., Oskin M. Alembic: automatic locality extraction via migration. *Proceedings of the 2014 ACM International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications.* 2014:879–894.

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Александр Дмитриевич Столяров**  
аспирант,  
Национальный исследовательский  
ядерный университет МИФИ  
(Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31)  
E-mail: mr.alexst@gmail.com

**Aleksandr D. Stolyarov**  
Postgraduate student,  
National Research Nuclear University  
MEPhI  
(31 Kashirskoe highway, Moscow, Russia)

**Владимир Владимирович Гордеев**  
генеральный директор,  
АЭРОЛАБС  
(Россия, г. Москва, ул. Котляковская, 3)  
E-mail: v.gordeev@aerolabs.aero

**Vladimir V. Gordeev**  
Chief executive officer,  
Aerolabs LLC  
(3 Kotlyakovskaya street, Moscow, Russia)

**Виктор Иванович Абрамов**  
доктор экономических наук, кандидат  
физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры управления  
бизнес-проектами,  
Национальный исследовательский  
ядерный университет МИФИ  
(Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31)  
E-mail: viabramov@mephi.ru

**Viktor I. Abramov**  
Doctor of economical sciences,  
candidate of physical and mathematical  
sciences, associate professor,  
professor of the sub-department  
of business project management,  
National Research Nuclear University  
MEPhI  
(31 Kashirskoe highway, Moscow, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 18.12.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 13.03.2023**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ХАРАКТЕРА ЛИЧНОСТИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ НА ПРИМЕРЕ МЕТОДИКИ ММПИ

А. А. Полозов<sup>1</sup>, М. П. Штарк<sup>2</sup>, К. А. Полозова<sup>3</sup>,  
Н. А. Мальцева<sup>4</sup>, А. Р. Ахметзянов<sup>5</sup>

<sup>1,3,4</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Майнитек, Верхняя Пышма, Свердловская область, Россия

<sup>5</sup> Сургутский государственный педагогический университет, Сургут, Россия

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В работе поднимается проблема диагностики типов характера (ТХ) с помощью теста ММПИ. Обычный тест ММПИ состоит из 600 вопросов и занимает не менее 1,5 часов, при этом работодатель находится в зависимости от самооценки тестируемого, а ретестовая надежность ММПИ не установлена. *Материалы и методы.* Исследуется возможность определения одного из восьми ТХ по ММПИ по фотографии лица с использованием нейронной сети. Для этого с помощью ретестико-методологического анализа был выбран наиболее точный инструмент измерения типологии черт личности, после чего был собран датасет с фотографиями людей, согласившихся участвовать в эксперименте и прошедших двойное тестирование. Далее на полученном датасете, состоящем из 40 581 фотографии, была обучена нейронная сеть. *Результаты.* Созданная сверточная нейронная сеть (CNN) верно распознала 30 % ТХ из предоставленных ей 8116 фотографий при более высокой оперативности. *Выводы.* Полученные результаты сравнимы с оценками точности бумажного тестирования и показывают перспективность данного подхода.

**Ключевые слова:** личностные особенности, тестирование, психодиагностика, нормальность и патологичность личности, нейросеть

**Для цитирования:** Полозов А. А., Штарк М. П., Полозова К. А., Мальцева Н. А., Ахметзянов А. Р. Определение типа характера личности сверточной нейронной сетью на примере методики ММПИ // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 149–163. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-10

## DETERMINING OF PERSON'S CHARACTER TYPE BY CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK (USING THE MMPI METHODOLOGY)

A.A. Polozov<sup>1</sup>, M.P. Shtark<sup>2</sup>, K.A. Polozova<sup>3</sup>,  
N.A. Maltseva<sup>4</sup>, A.R. Akhmetzyanov<sup>5</sup>

<sup>1,3,4</sup> Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Maynitek LLC, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, Russia

<sup>5</sup> Surgut State Pedagogical University, Surgut, Russia

**Abstract.** *Background.* This paper raises the problem of diagnosing character types (CT) using the MMPI test. The usual MMPI test consists of 600 questions and takes at least 1.5

hours, where the employer depends on the self-esteem of the test taker, and the retest reliability of the MMPI has not been established. *Materials and methods.* This paper researches the possibility of determining one of the eight CT by MMPI by a photo with trained convolutional neural network (CNN). To do this, using theoretical and methodological analysis, the most accurate tool for measuring the typology of personality traits was selected, after which a dataset was collected with photos of people who agreed to participate in the experiment and passed double testing. Next, a neural network was trained on the resulting dataset consisting of 40,581 photos. *Results.* The convolutional neural network (CNN) created by us correctly recognized 30 % of the 8116 photos provided to it with higher speed. *Conclusions.* Obtained results are comparable with estimated accuracy of paper testing and show the prospects of this approach.

**Keywords:** personality traits, testing, psychodiagnostics, normality and pathology of personality, neural network

**For citation:** Polozov A.A., Shtark M.P., Polozova K.A., Maltseva N.A., Akhmetzyanov A.R. Determining of person's character type by convolutional neural network (using the MMPI methodology). *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(1):149–163. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-10

### ***Введение***

Психодиагностика как получение объективной информации о развитии личности, типологизации личности представляет огромный научный интерес. Цифровая трансформация способов получения необходимых для обеспечения психологической деятельности данных претерпела существенные изменения, убрав из подготовительного этапа и этапа интерпретации данных бланчный (бумажный) вариант психодиагностики. Ресурсы IT-технологий и активное внедрение нейросети в процессы исследования психологических феноменов благополучия человека позволяют расширить форму применения психодиагностики, создав возможности для получения информации о личности и ее развитии.

Наиболее адекватной для целей типирования личности и психологического отбора, по нашему мнению, является Миннесотский многофазный личностный тест (ММПИ) – результат многолетнего труда и творческих поисков клинических психологов McKinley, Hathaway в 1948 г. Коэффициент ретестовой надежности шкал ММПИ в различных группах обследованных колеблется от 0,05 до 0,86 и в среднем составляет 0,50–0,80 [1]. Сокращенный многофакторный опросник для исследования личности (СМОЛ) является адаптированным и стандартизированным вариантом психологического анкетного теста Mini-Mult (71 вопрос), который представляет собой сокращенную форму опросника ММПИ. Коэффициент ретестовой надежности шкал в различных группах колеблется от 0,05 до 0,86. Согласно данным [2], тест-ретестовая корреляция между полной формой ММПИ и Mini-Mult показала некоторые потери в надежности краткой формы (в среднем 9 %).

### ***Материалы и методы исследования***

Анализ данных, полученных в результате диагностики черт характера личности, базируется на средних показателях. В связи с этим значима проблема надежности психологической оценки. Средние значения являются

ориентирами, «опорными» точками диагностического заключения исследователя, так как дают представления о некотором стандарте, норме проявления личностных черт. Анализ представлений о наиболее часто встречающихся характеристиках позволяет выявить ориентиры, служащие основой построения индивидуальности. Мода 1 отражает типы включенных в выборку групп, поэтому целесообразна ориентация на частотные тенденции при проведении психологического исследования. В связи с этим выявленные сочетания черт «модальной» личности, т.е. соотнесенного с модой, будут более надежны для построения прогноза, нежели сочетания черт средних значений, вычисленного по традиционной формуле, где точкой отсчета является среднее арифметическое.

**Цель исследования:** создание сверточной нейронной сети (CNN), распознающей на основе фотографии лица один из восьми типов характера (на примере методики ММРІ).

**Решаемые в исследовании задачи:**

- выделение наиболее адекватных психодиагностических инструментов для определения типов характера;
- создание базы данных из фотографий людей, которые прошли двойное тестирование с совпадающими результатами (ретестовой надежностью);
- подбор алгоритма создания сверточной нейросети для получения наиболее высокого уровня правильного распознавания типа характера.

**Гипотеза работы:** замена бумажных технологий самоидентификации типов характера на нейронную сеть покажет более высокий результат точности ответов за счет обобщения всех имеющихся изображений и отсутствия фактора субъективности оценки.

ММРІ представляет собой тест анкетного типа, состоящий из 566 утверждений, которые испытуемые должны признать верным для себя или отвергнуть. СМОЛ является адаптированным и стандартизированным вариантом психологического анкетного теста Mini-Mult, который представляет собой сокращенную форму опросника ММРІ. Методика позволяет оценить уровень нервно-эмоциональной устойчивости, степень интеграции личностных свойств, уровень адаптации личности к социальному окружению. Тест состоит из 71 утверждения, относящихся к 11 шкалам: восемь основных (1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9) и три дополнительных (L, F, K). Номера шкал СМОЛ совпадают с номерами соответствующих шкал ММРІ. Каждая из основных шкал связана с определенным свойством личности. Подробное описание шкал и схемы интерпретации тестовых результатов излагается в специальных руководствах. На этапе предварительного тестирования используются только численные значения показателей СМОЛ.

Другим тестом ТХ было описание ключевых характеристик из справочника [3]. Тестируемый читал все восемь описаний и выбирал наиболее соответствующее. В случае совпадения результатов с результатами теста СМОЛ считали ТХ установленным. В этом случае 2–3 фотографии тестируемого с его страницы в соцсетях вносили в соответствующую группу датасета.

Отвечая на задачу измерения существенных свойств в 1948, 1954 гг. в результате многолетнего труда была разработана методика ММРІ, в которой выделены следующие типы характера:

1. Шизоидный – одиночество, фантазии, холодность, избирательность.
2. Нарцисс – зависть, переоценка себя, потребность в преклонении.

3. Параноидальный – мнительность, пренебрежение другими, неуживчивость.
  4. Комппульсивный – сомнения, педантизм, мешающая делу скрупулезность.
  5. Психопатический – бессердечие, желание «сделать всех», пренебрежение.
  6. Истерический – демонстративность, театральность, привлечение внимания.
  7. Депрессивный – соглашательство, боязнь быть покинутым, депрессия.
  8. Мазохистический – терпение в надежде на последующее благо.
- Таким образом, на начальном этапе работы ожидаемым числом типов характера стало восемь.

**Сверточная нейронная сеть** (Convolutional Neural Network, CNN) – специальная архитектура искусственных нейронных сетей, предложенная Яном Лекуном в 1988 г. и нацеленная на эффективное распознавание образов.

Исследователи отмечают: «Оценка личностных качеств в настоящее время является ключевой частью многих важных социальных действий, таких как поиск работы, предотвращение несчастных случаев на транспорте, лечение заболеваний, работа полиции и межличностные взаимодействия. В предыдущем исследовании мы предсказывали личность на основе положительных образов студентов колледжа. Хотя этот метод обеспечивает высокую точность, опора только на положительные изображения приводит к потере большей части информации, связанной с личностью. Наши новые результаты показывают, что, используя реальные 2,5D статические изображения контуров лица, можно делать статистически значимые прогнозы о более широком диапазоне личностных качеств как мужчин, так и женщин. Мы решаем задачу всестороннего понимания черт личности человека, разрабатывая мультиперспективную 2,5-мерную гибридную личностно-вычислительную модель для оценки потенциальной корреляции между статическими изображениями контура лица и характеристиками личности. Наши экспериментальные результаты показывают, что глубокая нейронная сеть, обученная на больших размеченных наборах данных, может надежно прогнозировать многомерные характеристики личности людей с помощью 2,5D статических изображений контуров лица, а точность прогнозирования выше, чем у предыдущего метода с использованием 2D-изображений» [4].

Определение типа по типологии MBTI обычно проводят с помощью композитных изображений, составленных из лиц людей с определенной психологической функцией данной типологии и «Алгоритм психодиагностики по асимметрии лица» А. Н. Ануашвили [5]. В частности, специалисты из Mail.Ru Group и Frank RG [6, 7] исследовали влияние психологического типа потребителя на его финансовое поведение на основе MBTI. Сравнение лица тестируемого человека с композитными лицами обычно происходит с помощью сверточной нейронной сети. Есть решения, осуществляющие поиск лиц на изображении с помощью гистограмм направленных градиентов HOG (<https://github.com/IvanBein/CompVision>).

Схожая с нашей работа проводилась исследователями из Высшей школы экономики. Российские математики и психологи ВШЭ разработали нейросеть, которая научилась угадывать некоторые черты характера людей по их

фотографиям, и опубликовали статью в журнале Scientific Reports [8]. Главное отличие состоит в том, что ими изучалась возможность прогнозирования профилей личности Большой пятерки на основе фотографий лица человека. Участники-добровольцы ( $N = 12\ 447$ ) предоставили *свои фотографии лиц* (31 367 изображений) и заполнили самооценку черт Большой пятерки. Затем был обучен каскад искусственных нейронных сетей (ИНС) на большом размеченном наборе данных, чтобы предсказать результаты Большой пятерки, о которых сообщают сами участники. Наивысшая корреляция между наблюдаемыми и предсказанными результатами теста были среди добросовестности (сознательности) с показателем 0,360 для мужчин и 0,355 для женщин, а средняя корреляция составила 0,243.

Изображения (фотографии и видеокadres) подвергались трехступенчатой процедуре проверки, направленной на удаление фальшивых и некачественных изображений. Во-первых, изображения без человеческих лиц или с несколькими человеческими были удалены с помощью алгоритмов компьютерного зрения. Во-вторых, изображения знаменитостей идентифицировались и удалялись с помощью специальной нейронной сети, обученной на наборе данных фотографий знаменитостей (CelebFaces Attributes Dataset (CelebA),  $N > 200\ 000$ ), которая была дополнительно обогащена изображениями российских знаменитостей. После этого во время ручной проверки были удалены фото с частично закрытыми лицами, фото со следами изменения в графических редакторах, а также любые другие поддельные изображения.

Изображения, сохраненные для последующей обработки, были преобразованы в одноканальный 8-битный формат оттенков серого с использованием платформы OpenCV (opencv.org). Положение головы измерялось с помощью собственной специализированной нейронной сети (многослойного персептрона), обученной на выборке из 8000 изображений.

Затем ими была оценена эмоциональная нейтральность с помощью Microsoft Cognitive Services API и были удалены эмоциональные фото. Наконец, были применены функции обнаружения лица и глаз, выравнивания, изменения размера и обрезки, доступные в наборе инструментов с открытым исходным кодом Dlib (dlib.net).

Окончательный объединенный набор данных включал 12 447 действительных вопросников и 31 367 связанных фотографий после процедур проверки данных (ниже). Возраст участников варьировался от 18 до 60 лет. Набор данных был разбит случайным образом на набор обучающих данных (90 %) и тестовый набор данных (10 %), используемый для проверки модели прогнозирования. Набор проверочных данных включал ответы 505 мужчин, предоставивших 1224 изображения лица, и 740 женщин, предоставивших 1913 изображений. Из-за полового диморфизма черт лица и некоторых личностных черт все прогностические модели обучались и проверялись отдельно для мужских и женских лиц.

Полученные данные убедительно подтверждают возможность прогнозирования многомерных профилей личности на основе статических изображений лица с использованием ИНС, обученных на больших размеченных наборах данных.

Схожие задачи с акцентом на различные аспекты решались в работах [9–16].

### Экспериментальная часть

В алгоритме используется сверточная нейронная сеть Resnet34 [4].

Она состоит из 34 слоев свертки и 3,6 миллиардов параметров обучения. Данная нейросеть достигла наименьшей ошибки в задачах классификации, которая превзошла даже человеческий результат.

Основная идея сверточной сети заключается в постепенном изучении более сложных признаков. Первый слой изучает края, второй слой изучает формы, третий слой – объекты, все последующие слои способны обучать сочетание характерных признаков каждого класса. Таким образом образуется иерархическая структура, где каждый следующий уровень выделяет все более и более высокоуровневые признаки.

Среди основных достоинств сети ResNet рассматривается решение проблемы затухающего градиента, когда с увеличением количества слоев свертки ухудшается точность предсказания.

Чтобы преодолеть эту проблемы, в архитектуру сети были добавлены так называемые остаточные блоки. Сверточные слои организованы в так называемые вычислительные блоки (рис. 1), которые трансформируют и передают информацию от уровня к уровню. Суть таких чередующихся блоков заключается в добавлении выходных данных предыдущего уровня в слой впереди:

$$Y = F(x, \{W_i\}) + x. \quad (1)$$

В случае когда выходные данные  $x$  и функция  $F(x)$  имеют разную размерность, данные умножаются на линейную проекцию  $W$ , чтобы расширить каналы быстрого доступа для соответствия. Это позволяет объединить входные данные  $x$  и  $F(x)$  в качестве входных данных для следующего слоя.

Это решает проблему деградации, понижения точности, характерную для глубоких нейронных сетей.

В качестве финального классификатора в ResNet34 используется pooling-слой с softmax-функцией, способный выявить наиболее значимые параметры входных данных и определить вероятность принадлежности к тому или иному классу.

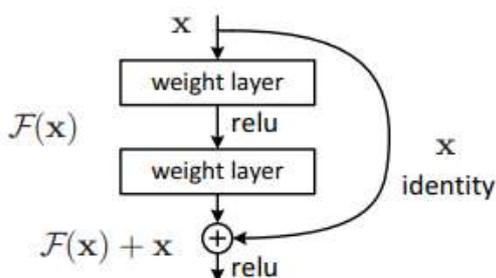


Рис. 1. Вычислительный блок сети ResNet34

Размер изображения изменяется с помощью случайной выборки его короткой стороны в [256, 480] для увеличения масштаба. Кадрирование  $224 \times 224$  выбирается случайным образом из изображения или его горизонтального смещения с вычитанием среднего значения для каждого пикселя. Скорость обучения стартует с 0,1 и делится на 10, когда изменение ошибок выходит на плато,

модели обучаются вплоть до  $60 \times 10\,000$  итераций. Они используют снижение веса 0,0001 и импульс 0,9 [8, 17].

Для подготовки изображений (обрезка и поворот лица) используется библиотека `img2pose`, написанная с использованием библиотеки `PyTorch`. На одной из стадий эксперимента использовалась библиотека `Dlib`. `Dlib` – библиотека, содержащая алгоритмы машинного обучения и различные инструменты для работы с изображениями лиц. В ней реализованы методы обнаружения лица на фотографии с применением НОГ, глубокой нейронной сети и других способов. Многие библиотеки и фреймворки, заточенные под работу с изображениями лиц, используют `dlib` под капотом. Нейрон получает на вход только ограниченный участок изображения  $h \times w$ . Следующий нейрон работает со следующим участком изображения, который может частично пересекаться с участком соседнего нейрона. CNN создает дескриптор из 128 чисел так, что у одного и того же человека дескрипторы в евклидовом пространстве будут находиться ближе к друг другу, а у разных людей дальше.

В исследовании приняли участие мужчины и женщины в возрасте от 18 лет, выразившие желание добровольного участия в исследовании черт характеров. Общее количество испытуемых 2000 человек [18, 19]. На сервисе `profurfu.ru` использовался тест СМОЛ, который представляет собой сокращенную форму опросника ММРІ. Тестируемый читал все восемь описаний и выбирал наиболее соответствующее. В случае совпадения результатов с результатами теста СМОЛ тип характера испытуемого считали установленным. Однако ретестовая надежность СМОЛ на данном этапе достоверно не установлена.

В связи с тем, что данные по ретестовой надежности МВТІ, СМОЛ неизвестны, возникла необходимость в использовании второго теста. Авторы предполагали, что определение ТХ двумя разными тестовыми решениями позволит сформировать датасет из надежных данных. Выбор тестов для данного набора ТХ был невелик. Другим тестом ТХ стало описание ключевых характеристик из справочника [3]. Тестируемый читал все восемь описаний и выбирал наиболее соответствующее. В случае совпадения результатов с результатами теста СМОЛ считали ТХ установленным. В этом случае 2–3 фотографии тестируемого с его страницы в соцсетях вносили в соответствующую группу датасета.

Если взять последние 2000 протестированных и попытаться определить их принадлежность к типу характера, то получим данные табл. 1. Поскольку одновременно определяли МВТІ, то данные приведены с учетом этого фактора.

Как видно из табл. 1, в наибольшей степени встречается шизоидный тип характера, для которого характерна замкнутость, отгороженность от окружающих, неспособность или нежелание устанавливать контакты, снижение потребности в общении. Сочетание противоречивых черт в личности и поведении – холодности и утонченной чувствительности, упрямства и податливости, настороженности и легковерия, апатичной бездеятельности и напористой целеустремленности, необщительности и неожиданной назойливости, застенчивости и бестактности, чрезмерных привязанностей и немотивированных антипатий, рациональных рассуждений и нелогичных поступков. Меньше всего его любят параноидальные и нарциссические личности.

Таблица 1

 Соотношение тестируемых по типам личности (МВТИ)  
и типам характера (%)

Типы личности/ характера	ENTP	ISFP	ESFJ	INTJ	ENFJ	ISTJ	INFP	ESTP	INTP	ESFP	ENTJ	ISFJ	ESTJ	INFJ	ENFP	ISTP	% по TX
Шизоидный	1,9	0,9	1,9	2,1	2,7	1,5	2,1	0,6	2,8	0,6	1,3	0,8	0,9	2,1	0,4	2,3	24,9
Параноидальный	0,0	0,0	1,1	0,2	0,8	0,4	0,6	0,4	1,1	0,4	0,4	0,8	0,2	0,9	0,2	0,4	7,8
Нарцисс	0,2	0,6	1,1	0,4	0,6	0,0	0,4	0,2	0,6	0,4	0,4	0,2	0,8	0,6	0,6	0,9	7,8
Психопатический	0,8	0,8	1,3	0,6	1,5	0,2	0,6	0,2	1,3	0,4	0,9	0,6	1,9	1,1	0,4	0,8	13,3
Компульсивный	0,4	1,1	1,5	0,6	0,4	0,4	1,1	0,4	0,4	1,1	0,8	1,5	1,3	1,3	1,3	1,9	15,6
Истерический	0,4	0,4	0,8	0,4	0,9	0,2	0,9	0,8	0,4	0,4	0,2	0,9	0,2	1,1	0,4	1,1	9,5
Депрессивный	0,2	0,8	1,5	1,3	0,4	0,9	0,0	0,2	0,2	0,4	0,8	0,6	0,9	0,9	0,6	2,1	11,8
Мазохистический	0,8	0,4	0,4	0,4	0,9	0,4	0,8	0,0	0,8	1,1	0,8	0,2	0,8	0,8	0,4	0,8	9,5
% от всех	4,55	4,93	9,68	5,88	8,16	4	6,45	2,66	7,59	4,74	5,5	5,5	7,02	8,92	4,17	10,2	100

Примерно в середине группы расположены компульсивный, психопатический и депрессивный типы характера.

Другим важным наблюдением для указанных последних 2000 из числа протестированных следует считать надежность тестирования. Только 32 % протестированных показали одинаковый результат на обоих тестах. В остальных случаях их мнение расходилось. Это исходная точка сравнения, которая показывает целесообразность нашей работы. Мы накапливали данные по протестированным и не публиковались долгое время, поскольку полученные значения были ниже 32 %. В этом случае значимость теста СМОЛ, например, была выше созданной нами CNN.

В ходе работы провели два предварительных эксперимента. Долгое время подбирали технологию CNN для данного исследования. Например, искали возможность для использования так называемых точек Landmarks для тестирования по типам характера. В библиотеке dlib существует программа, которая возвращает координаты 68 точек на лице. Это позволяет, например, получить средние значения таких координат для всех фотографий по каждому типу характера. В случае успеха мы могли получить еще более высокие проценты распознавания, однако на практике наш эксперимент не удался. Все-таки индивидуальные различия, связанные с остальными личностными чертами, оказались слишком велики для использования данного инструментария. В другом предварительном эксперименте использовался язык программирования C++ и библиотека Dlib. Нейронная сеть из библиотеки Dlib имеет архитектуру сети ResNet 34 с несколькими удаленными слоями и уменьшением количества фильтров на слой вдвое. Сеть была обучена с нуля на наборе данных около 3 миллионов лиц. Этот набор данных является производным от нескольких наборов данных. Модель имеет точность 99,38 % в стандартном тесте «Labeled Faces in the Wild». На основе модели был обучен классификатор лиц по типу характера. Обучение проводилось на 13 685 фотографиях лиц. На фотографии выполняется поиск лиц с помощью детектора лиц, далее найденное лицо передается на нейросеть. Нейронная сеть выдает вектор признаков размерностью 128, на основе этого вектора выполняется классификация. Точность классификатора составила 20 %. Сеть обучалась четыре дня.

Накопление фотографий шло достаточно медленно в течение нескольких лет. На сегодня накоплено 44 000 фотографий.

Исходный датасет по итогам работы состоял из 44 000 фотографий, полученных от 16 000 тестируемых. Есть участники, имеющие разное число фото, например только одно, поэтому детальная оценка числа тестируемых затруднительна. Процесс подготовки данных для CNN TX начинается с обрезания всех фото. Оставляют только овал лица. Так проще обучить CNN. Однако этот процесс сопряжен с потерями определенной части фотографий. Фото были разделены на восемь групп. Требования к фотографиям: без экспрессии, фото в профиль, фото в фас, не менее 200×200 пикселей, не групповые, без очков, головного убора, с минимальным отклонением положения головы от вертикали. Допускались фото с небольшим поворотом или наклоном лица. Однако для лучших результатов CNN целесообразно обрезать фотографии и тем самым избавить нейросеть от ненужной работы.

Обрезка фото с помощью библиотеки, детектирующей лица, убирает также и фотографии в слишком плохом качестве. Далее датасет был проверен вручную на отсутствие артефактов обрезки. После обрезки фото в нашем распоряжении осталась 40 581 фотография. Тренировочный датасет составлял 80 % датасета, а тестовый – 20 %. Таким образом, в среднем, по 4000 фото на каждый TX. Отдельно был создан тестовый датасет размером 8116 изображений.

Использовался следующий стек технологий: язык Python, библиотеки Keras, Tensorflow, PyTorch, Numpy, Pandas, Sklearn. На рис. 2 справа показана структура использованной нами нейросети ResNet34.

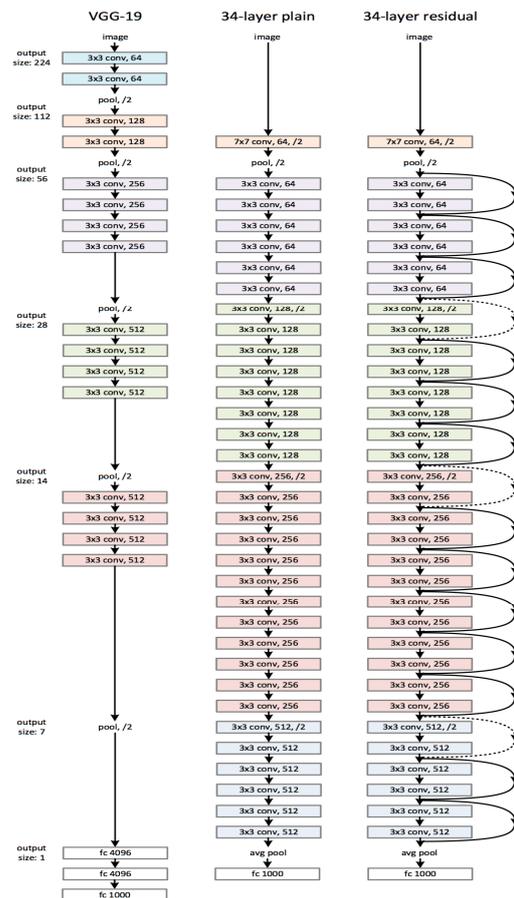


Рис. 2. Структура использованной нейросети

Она вдохновлена нейросетью VGG, при этом к ней добавлены остаточные соединения, которые превращают сеть в ее остаточную версию. Это решает проблему нейросети VGG с затухающим градиентом, который не позволял ей наращивать глубину слоев. С помощью ResNet градиенты могут передаваться непосредственно через пропускные соединения в обратном направлении от более поздних слоев к начальным фильтрам. Они обозначены закругленными стрелками справа от блоков.

Conv – слой свертки, который создает ядро свертки указанного размера (размером 3×3 или 7×7 для первого слоя) для извлечения признаков изображения. На схеме нейросети ResNet34 каждый из слоев следует одному и тому же паттерну: мы видим группы слоев с фиксированным размером карты признаков (feature map) со следующими параметрами: [64, 128, 256, 512], причем пропускные соединения обходят входные данные каждые два слоя.

Pool и avg pool – слоя подвыборки, выбирающие из заданного окна максимальный элемент и снижающий размерность предыдущего слоя.

Нейросеть имеет следующие слои (из-за размера графика они не изображены на рисунке):

– Flatten – вспомогательный слой, который позволяет перейти от сверточной части сети, выделяющей признаки изображения, к полносвязной части, где нейросеть обучается классификации на основе ранее выделенных признаков. Он переводит матрицу признаков в формат вектора;

– Dense – полносвязный слой нейросети.

Обучение нейросети ResNet34 проходило с помощью YOLOv5 (URL: <https://github.com/ultralytics/yolov5>), лучшие результаты были получены со следующими параметрами:

- 1) количество эпох – 150;
- 2) размер batch – 64;
- 3) размер изображения – 224×224;
- 4) оптимизатор обучения – Adam;

– коэффициент скорости обучения (learning rate) – динамический, изначально равен 0,001, далее изменяется по формуле

$$lrf = (1 - x / epochs) * (1 - lrf) + lrf,$$

где epochs – количество эпох, lrf = 0.01;

– регуляризация (label smoothing) – 0.1;

– функция ошибки (loss) – smartCrossEntropyLoss.

Использовались следующие настройки обработки изображений для аугментации:

HorizontalFlip(p=0.5) – С вероятностью 50 % изображение будет зеркальным;

ColorJitter(p=0.5, brightness=[0.6, 1.4], contrast=[0.6, 1.4], saturation=[0.6, 1.4], hue=[0, 0]) – Цветовые понижение яркости контрастности и насыщенности;

Normalize(p=1.0, mean=(0.485, 0.456, 0.406), std=(0.229, 0.224, 0.225), max\_pixel\_value=255.0) – нормализация изображения;

после чего была произведена оценка работы нейросети на тестовом наборе. Для получения итогового результата использовалась встроенная в YOLOv5 метрика top1. Эта метрика берет класс, предсказанный на изображении с

наибольшей вероятностью, и сравнивает его с ожидаемым классом, который находится на изображении на самом деле. По сути, это метрика точности Accuracy. Она вычисляется по формуле  $(TP+TN) / (TP+TN+FP+FN)$ , где TP – True Positive, верно положительный ответ, TN – True Negative, верно отрицательный ответ, FP – False Positive, ложно положительный ответ, FN – False Negative, ложно отрицательный ответ. В нашем случае это отношение правильных ответов нейросети к общему числу правильных ответов. Результаты распознавания по классам отображены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты распознавания лиц обученной нейросетью по классам типов характера

Тип характера	% распознавания
Шизоидный	19 %
Параноидальный	33 %
Нарцисс	21 %
Психопатический	40 %
Компульсивный	26 %
Истерический	37 %
Депрессивный	22 %
Мазохистический	30 %

### *Результаты*

В результате проведенного эксперимента CNN ResNet34 лучше всего определяла психопатический (40 %), истерический (37 %) и параноидальный (33 %) ТХ. Средний результат распознавания признаков равен 30 %. CNN позволяет получать результаты без изучения физиогномических признаков. Это сравнимо с 32 %, которые мы наблюдали при определении ТХ из традиционного «бумажного» тестирования. Данные результаты показывают то, что при увеличении количества фотографий растут и проценты распознавания, что означает перспективность такого подхода.

### *Заключение*

Статья посвящена проблеме оптимизации и объективизации данных психодиагностики. Использование нейронной сети (CNN) для тестирования персоналии представляется первым шагом на пути этого процесса. В обычном тесте исследователи находятся в зависимости от способности к самоидентификации тестируемого, которая может быть невысокой. К тому же у испытуемого может не быть способности оценивать себя в сравнении с другими. В случае с нашей CNN происходит отнесение испытуемого к одному из восьми классов на основе обобщения 40 581 фотографии. Используемый в практической психологии метод ретестовой надежности в перспективе может быть заменен на метод визуального соответствия обученной CNN. Это позволяет в разы поднять эффективность уже используемых методик (как, например, profurfu.ru), где обычный тест используется вместе с анализом фото. Для повышения надежности CNN-тестирования используются три фотографии в фас без экспрессии. Решение принимается в случае совпадения результата теста по двум

и более фото. Наряду со значимыми эффектами замены бланчного тестирования на диагностику с помощью нейросети существует ряд ограничений. Так, предельное значение в 100 % достичь проблематично из-за того, что к тесту изначально были допущены фото тестируемых с углами наклона головы. Другой проблемой является национальная специфичность лиц. Использовали фото людей европейской внешности, но маловероятно получить тот же результат на лицах из азиатских стран. Вышеуказанные недостатки устранимы в результате развития IT-технологий и чувствительности нейросетей. С точки зрения психологических составляющих ограничения к использованию отсутствуют.

С точки зрения неспециалиста по психологии вызывает сомнение возможность определения типа характера по формальным признакам: и с помощью традиционных методик, и с помощью предложенного в статье нейросетевого подхода составляет порядка 30 %. Однако методика ММРІ используется с 1948 г. с относительно невысокой ретестовой надежностью. Мы сумели относительно быстро выйти на аналогичные результаты и имеем перспективу удвоения показателя за счет акцента на ряд признаков. Например, люди с психопатическим типом характера имеют почти вертикально стоящие волосы прически, а мазохистического – опущенные края бровей. Мы не использовали эти признаки, но уже получили 30 % верных ответов.

### ***Выводы***

1. Проблема достоверности тестирования в психологии становится сдерживающим фактором развития этой научной дисциплины. Результаты тестирования предполагают адекватную сравнительную самооценку абитуриента самого себя относительно других, чего трудно ожидать на практике. Общепринятой практикой является определение на основе ретестовой надежности, которая, как правило, составляет 1/3. Это означает потерю большей части данных, снижение эффективности эксперимента, недостоверность итоговых результатов, неуверенность в правильности сделанной работы.

2. Современные IT-технологии ищут себе применение в других научных отраслях. Никого не удивляет онкологический диагноз на основе обученной сверточной нейросети. В нашей работе была предпринята попытка определить тип характера на основе анализа фотографии созданной CNN. Мы исходно использовали 44 000 фотографий. При этом у одного человека могло быть 2–3 фото. После процедуры обрезки фото (овал лица), остались годными уже 40 581 фото, примерно по 4000 фото на каждый ТХ. Созданный нами проверочный датасет показал 30 % правильных ответов, что сравнимо с процентами, полученными при бумажном тестировании.

### ***Этическое одобрение***

Исследование проводилось в соответствии с Хельсинкской декларацией. Протокол исследования был одобрен комитетом по этике исследований УрФУ. Мы получили согласие участников использовать свои данные и фотографии в исследовательских целях для профориентационных целей. Никакой информации или изображений, которые могли бы привести к идентификации участников исследования, опубликовано не было.

### Список литературы

1. The Cambridge Handbook of Personality Psychology / ed. by P. J. Corr, G. Matthews. Cambridge University Press, 2009. P. 849.
2. Butcher J. N., Hostetler K. Abbreviating MMPI item administration: What can be learned from the MMPI for the MMPI-2? // *Psychological Assessment: A Journal of Consulting and Clinical Psychology*. 1990. Vol. 2. P. 12–21. doi:10.1037/1040-3590.2.1.12
3. Таланов В. Л., Малкина-Пых И. Г. Справочник практического психолога. СПб. : Сова ; М. : ЭКСМО, 2002. 928 с.
4. 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 (CVPR)*. 2016. P. 770–778.
5. Ануашвили А. Н. Объективная психология на основе волновой модели мозга. М. ; Варшава : Экон-Информ, 2008. 292 с.
6. П. Дж. Вандер Рутон для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб. : Питер, 2018. 576 с.
7. Mail.Ru Group и Frank RG исследовали влияние психотипа клиента на его финансовое поведение. URL: <https://corp.mail.ru/ru/press/releases/10110> (дата обращения: 12.01.2023).
8. Kachur A., Osin E., Davydov D. [et al.]. Assessing the Big Five personality traits using real-life static facial images *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. doi:10.1038/s41598-020-65358-6
9. Barrick M., Mount M. The big five personality dimensions and job performance: a meta-analysis // *Personnel psychology*. 1991. Vol. 44, iss. 1. P. 1–26.
10. Ang S., Van Dyne L., Koh C. Personality Correlates of the Four-Factor Model of Cultural Intelligence // *Group & Organization Management*. 2006. Vol. 31.
11. Viola P., Jones M. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features // *Accepted conference on computer vision and pattern recognition*. 2001. P. 1–9.
12. Turk M., Pentland A. Face Recognition using Eigenfaces // *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (3–6 June 1991, Maui, HI, USA)*. 1991. P. 586–591.
13. Vijaya Lata Y., Kiran C., Ram H. [et al.]. Facial Recognition using Eigenfaces by PCA // *International Journal of Recent Trends in Engineering*. 2009. Vol. 1.
14. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool L. V. Speeded-Up Robust Features (SURF) // *Computer Vision and Image Understanding*. 2008. Vol. 110. P. 346–359.
15. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering // *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015. P. 815–823.
16. Xie C., Tan M., Gong B. [et al.]. Adversarial Examples Improve Image Recognition // *Computer vision and Pattern Recognition*. 2019.
17. Img2pose: Face Alignment and Detection via 6DoF, Face Pose Estimation. URL: <https://github.com/vitoralbiero/img2pose> (дата обращения: 12.01.2023).
18. Полозов А. А. Психологические портреты персонала спортивного клуба // *Спортивный психолог*. 2005. № 3.
19. Полозов А. А., Полозова Н. Н. Модули психологической структуры в спорте. М. : Советский спорт, 2009.

### References

1. *The Cambridge Handbook of Personality Psychology*. Ed. by P. J. Corr, G. Matthews. Cambridge University Press, 2009:849.
2. Butcher J.N., Hostetler K. Abbreviating MMPI item administration: What can be learned from the MMPI for the MMPI-2? *Psychological Assessment: A Journal of Consulting and Clinical Psychology*. 1990;2:12–21. doi:10.1037/1040-3590.2.1.12
3. Talanov V.L., Malkina-Pykh I.G. *Spravochnik prakticheskogo psikhologa = Handbook of a practical psychologist*. Saint Petersburg: Sovo; Moscow: EKSMO, 2002:928. (In Russ.)

4. 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 (CVPR)*. 2016:770–778.
5. Anuashvili A.N. *Ob"ektivnaya psikhologiya na osnove volnovoy modeli mozga = Objective psychology based on the wave model of the brain*. Moscow; Varshava: Ekon-  
Inform, 2008:292. (In Russ.)
6. Vander P.Dzh. *Python dlya slozhnykh zadach: nauka o dannykh i mashinnoe obuchenie = Python for complex tasks: Data science and machine learning*. Saint Petersburg: Piter, 2018:576. (In Russ.)
7. *Mail.Ru Group i Frank RG issledovali vliyanie psikhotipa klienta na ego finansovoe povedenie = Mail.Ru Group and Frank RG investigated the influence of the client's psychotype on his financial behavior*. (In Russ.). Available at: <https://corp.mail.ru/ru/press/releases/10110> (accessed 12.01.2023).
8. Kachur A., Osin E., Davydov D. et al. *Assessing the Big Five personality traits using real-life static facial images Scientific Reports*. 2020;10. doi:10.1038/s41598-020-65358-6
9. Barrick M., Mount M. The big five personality dimensions and job performance: a meta-analysis. *Personnel psychology*. 1991;44(1):1–26.
10. Ang S., Van Dyne L., Koh C. Personality Correlates of the Four-Factor Model of Cultural Intelligence. *Group & Organization Management*. 2006;31.
11. Viola P., Jones M. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. *Accepted conference on computer vision and pattern recognition*. 2001:1–9.
12. Turk M., Pentland A. Face Recognition using Eigenfaces. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (3–6 June 1991, Maui, HI, USA)*. 1991:586–591.
13. Vijaya Lata Y., Kiran C., Ram H. et al. Facial Recognition using Eigenfaces by PCA. *International Journal of Recent Trends in Engineering*. 2009;1.
14. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool L.V. Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*. 2008;110:346–359.
15. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015:815–823.
16. Xie C., Tan M., Gong B. et al. Adversarial Examples Improve Image Recognition. *Computer vision and Pattern Recognition*. 2019.
17. *Img2pose: Face Alignment and Detection via 6DoF, Face Pose Estimation*. Available at: <https://github.com/vitoralbiero/img2pose> (accessed 12.01.2023).
18. Polozov A.A. Psychological portraits of sports club staff. *Sportivnyy psikholog = Sports psychologist*. 2005;(3). (In Russ.)
19. Polozov A.A., Polozova N.N. *Moduli psikhologicheskoy struktury v sporte = Modules of psychological structure in sports*. Moscow: Sovetskiy sport, 2009. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Андрей Анатольевич Полозов**  
доктор педагогических наук, профессор,  
Уральский федеральный университет  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)  
E-mail: a.a.polozov@mail.ru

**Andrey A. Polozov**  
Doctor of pedagogical sciences, professor,  
Ural Federal University  
(19 Mira street, Yekaterinburg, Russia)

**Мария Павловна Штарк**  
младший аналитик  
группы системного анализа,  
Майнитек  
(Россия, Свердловская обл., г. Верхняя  
Пышма, ул. Уральских Рабочих, 42а)  
E-mail: maria\_shtark@mail.ru

**Maria P. Shtark**  
Junior analyst of the group of system analysis,  
Maynitek LLC  
(42a Uralskih Rabochih street, Verkhnyaya  
Pyshma, Sverdlovsk region, Russia)

**Кристина Андреевна Полозова**

студентка,  
Уральский федеральный университет  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)  
E-mail: a.a.polozov@mail.ru

**Kristina A. Polozova**

Student,  
Ural Federal University  
(19 Mira street, Yekaterinburg, Russia)

**Наталья Анатольевна Мальцева**

инженер,  
Уральский федеральный университет  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)  
E-mail: Natalia.maltseva.susu@gmail.com

**Natalya A. Maltceva**

Engineer,  
Ural Federal University  
(19 Mira street, Yekaterinburg, Russia)

**Артур Рахимзянович Ахметзянов**

преподаватель,  
Сургутский государственный  
педагогический университет  
(Россия, г. Сургут, 50 лет ВЛКСМ, 10/2)  
E-mail: Artur.rahimzyanovich@mail.ru

**Artur R. Akhmetzyanov**

Teacher,  
Surgut State Pedagogical University  
(10/2 50 years of the Komsomol street,  
Surgut, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 10.01.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 17.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 13.03.2023**

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА И ОБЪЕКТА ТЕХНОСФЕРЫ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

**О. Е. Безбородова**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
oxana243@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Имитационное моделирование является мощным инструментом исследования поведения различных систем, в том числе и системы «объект техносферы – человек». Одна из причин использования имитационного моделирования – это необходимость повышения уровня автоматизации обработки исходных данных для оперативного принятия управленческих решений. Цель проведенного исследования – это разработка имитационной модели взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек» на основе риска с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры средствами MatLAB/Simulink. *Материалы и методы.* Исследование проведено с использованием комплексного экосистемного подхода и методов анализа и синтеза, группировки и обобщения, а также математического и имитационного моделирования. *Результаты.* В результате моделирования с использованием фазовой плоскости получили две особых точки: «центр» или «фокус», устойчивость которой необходимо дополнительно исследовать математическими методами, и «седло», которая в этой системе неустойчива. *Выводы.* Исходя из этого, следует отметить, что если какое-либо состояние системы «объект техносферы – человек» удовлетворяет нас с точки зрения соотношения значений техногенного риска и риска для здоровья человека, то во всех случаях для его поддержания необходимо прикладывать усилия и затрачивать ресурсы, осуществляя лечебно-профилактические, природоохранные и технологические мероприятия.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная и управляющая система, имитационное моделирование, система дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры

**Для цитирования:** Безбородова О. Е. Имитационное моделирование взаимодействия человека и объекта техносферы в информационно-измерительных и управляющих системах обеспечения экологического благополучия человека // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 164–177. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-11

## SIMULATION MODELING OF THE INTERACTION OF A HUMAN AND AN OBJECT OF TECHNOGENICS ON THE BASIS OF RISK

**O.E. Bezborodova**

Penza State University, Penza, Russia  
oxana243@yandex.ru

---

© Безбородова О. Е., 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.* Simulation modeling is a powerful tool for studying the behavior of various systems, including the «technosphere object – human» system. One of the reasons for the use of simulation modeling is the need to increase the level of automation of the processing of initial data for the rapid adoption of managerial decisions. The purpose of the study is to develop a simulation model for the interaction of elements in the «technosphere object – human» system based on risk using the Lotka – Volterra system of differential equations using MatLAB/Simulink. *Materials and methods.* The study was carried out using an integrated ecosystem approach and methods of analysis and synthesis, grouping and generalization, as well as mathematical and simulation modeling. *Results.* As a result of modeling using the phase plane, two singular points were obtained: the «center» or «focus», the stability of which must be further investigated by mathematical methods, and the «saddle», which is unstable in this system. *Conclusions.* Proceeding from this, it should be noted that if any state of the «technosphere object – human» system satisfies us from the point of view of the correlation between the values of technogenic risk and the risk to human health, then in all cases it is necessary to make efforts and spend resources to maintain it, carrying out medical treatment, preventive, environmental and technological measures.

**Keywords:** information-measuring and control system, simulation modeling, system of Lotka – Volterra differential equations

**For citation:** Bezborodova O.E. Simulation modeling of the interaction of a human and an object of technogenics on the basis of risk. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(1):164–177. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-11

### **Введение**

Всемирная организация здравоохранения отмечает, что здоровье каждого человека на 50 % зависит от образа жизни, на 20 % – от состояния окружающей среды, на 20 % – от наследственности и 10 % – от медицины [1]. По прогнозам экспертов эти значения изменятся в ближайшие 30–40 лет, и зависимость физического состояния и самочувствия человека от состояния окружающей среды возрастет до 50–70 %, проявляясь и через наследственность, и через образ жизни [2]. В связи с этим очень важно контролировать воздействие объекта техносферы на человека и окружающую среду и управлять состоянием экологического благополучия человека с использованием современных технологий [3], к которым относят и различные виды моделирования.

Имитационное моделирование является мощным инструментом исследования поведения различных систем, в том числе и системы «объект техносферы – человек». Методы имитационного моделирования позволяют собрать необходимые данные об изменении состояния системы «объект техносферы – человек» в результате внешних воздействий путем исследования ее компьютерной модели. Одна из причин использования имитационного моделирования – это необходимость повышения уровня автоматизации обработки исходных данных для оперативного принятия управленческих решений. Проблемы, возникающие в системах такой сложности, могут быть проанализированы только с применением компьютерного моделирования.

Использование математического моделирования при изучении конкурирующих элементов системы «объект техносферы – человек» имеет преимущество, суть которого состоит в компьютерном моделировании реальных ситуаций и возможности многократного их повторения при различных исходных данных. Именно это позволит найти оптимальные решения проблем обеспечения экологического благополучия человека.

Цель проведенного исследования – это разработка имитационной модели взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек» на основе риска с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры.

Для достижения цели автором поставлены и решены следующие задачи: провести анализ моделей и средств моделирования в экологии; обосновать выбор модели системы «объект техносферы – человек»; провести имитационное моделирование системы «объект техносферы – человек» с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры средствами *MatLAB/Simulink*; проанализировать результаты моделирования.

Объектом исследования является имитационная модель системы «объект техносферы – человек» на основе системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры, предметом исследования являются закономерности процесса взаимодействия в системе «объект техносферы – человек».

Исследование проведено с использованием комплексного экосистемного подхода и методов анализа и синтеза, группировки и обобщения, а также математического и имитационного моделирования.

### *Материалы и методы*

Начало использования информационных технологий и математического моделирования для решения задач экологии, охраны окружающей среды и природопользования датируется 80-ми гг. XX в. В это время публикуется большое количество исследований по моделированию различных систем (биологических, медицинских, технических, социальных), подверженных случайным воздействиям. В них описание моделируемых объектов проводится дифференциальными уравнениями или системами дифференциальных уравнений. Дифференциальные уравнения достаточно адекватно моделируют динамические системы, но требуют введения дополнительных слагаемых и коэффициентов, учитывающих взаимное влияние элементов моделируемых систем и динамику параметров во времени [4–8].

Исследования динамических объектов с параметрами, меняющимися во времени случайным образом, представлены в работах [9–14].

Исходя из этого, актуальными являются исследования и разработка математических моделей (фактически цифровых двойников) для описания, исследования возможных состояний и выбора и формирования управляющих воздействий для таких объектов. В большей степени это актуально для элементов территориальной техносферы (человек, окружающая среда, объект техносферы), когда физические эксперименты громоздки, дороги и опасны.

Работы по моделированию в экологии условно можно подразделить следующим образом.

Во-первых, самые ранние работы, посвященные моделированию состояния отдельных сред и систем: сообществ фитопланктона и бактериальных сообществ [15], формирования урожая в агроэкосистемах, взаимодействия элементов в системе «пестициды – агробиоценоз» [13], изменения состояния атмосферы вблизи объекта техносферы [10, 12]. В работе [16] предложены динамические модели процессов развития эпидемий, предназначенные для оценивания заболеваемости и болезненности. В работе [8] проведено исследование традиционной модели взаимодействия биологических видов по типу «хищник – жертва» на качественном уровне, а также проведена идентификация особой

точки системы и анализ фазовых траекторий, получен общий аттрактор системы.

Во-вторых, более поздние работы, посвященные комплексной оценке состояния экологических систем, в которых представлены теория и методология имитационного моделирования в области охраны окружающей среды [17, 18]. В большинстве из них авторы предлагают для анализа и обеспечения устойчивости экосистем различного уровня различные инструменты, основанные на использовании информационных технологий – имитационным моделированием с использованием программных продуктов *Pilgrim* и *MathCAD*.

Лучшие результаты при имитационном моделировании дают методы анализа системной динамики, дискретно-событийное моделирование и мультиагентные технологии. Анализ системной динамики осуществляют с использованием специального программного обеспечения: *iThink*, *ModelMaker*, *PowerSim*, *VenSim*, дискретно-событийное моделирование с использованием *Facsimile*, *Tortuga*, *EcosimPro*, *Flexsim*, *Lanner*, *Promodel*, мультиагентные технологии осуществляют на базе программ *Galatea*, *NetLogo*, *Mobility Testbed*, *Swarm*, *RePast* [17].

Кроме специализированных программных продуктов есть российская программа, позволяющая осуществить сразу несколько видов имитационного моделирования – *The AnyLogic Company* [17]. Она в настоящее время является лидером в своей области в России и поддерживает все виды имитационного моделирования [17].

Для целей имитационного моделирования широко используют программы с графическим вводом моделируемых систем, например *MatLAB/Simulink* и *SimInTech*. Но наиболее известной и востребованной является *MatLAB/Simulink*, несмотря на то, что российский аналог *SimInTech* ей почти ни в чем не уступает.

Программы с графическим вводом моделируемых систем отличаются от мультиагентных технологий [19] структурным проектированием систем. Алгоритм начинается с определения качественного и количественного состава функциональных элементов и связей между ними, и далее осуществляется реализация всей модели [20].

Математические модели в программах с графическим вводом моделируемых систем реализуются в виде схемы, состоящей из отдельных блоков, реализующих математические действия и/или функции. Программы позволяют группировать совокупности блоков в подсистемы, из которых в дальнейшем составляют сложные модели. Например, модель системы из трех дифференциальных уравнений составляют из трех подсистем блоков, каждая из которых моделирует одно дифференциальное уравнение. Реализованная таким образом математическая модель – это функциональная схема, передающая аналоговые сигналы, несущие измеренные или рассчитанные данные. Ее отличие от *Arena* и *AnyLogic* заключается в структуре моделей. В *MatLAB/Simulink* и *SimInTech*, кроме самих объектов, устанавливают между блоками связи, которые передают результаты выполнения отдельных математических операций, что дает возможность представить всю модель целиком в графическом виде [20, 21].

Среды *MatLAB/Simulink* и *SimInTech* дают возможность построения имитационных моделей систем любой сложности и конфигурации.

Для обеспечения экологического благополучия человека в территориальной техносфере автором предложена интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система, упрощенная схема которой приведена на рис. 1.



Рис. 1. Упрощенная схема информационно-измерительной и управляющей системы обеспечения экологического благополучия человека [21]

Одна из функций предложенной системы – моделирование и прогнозирование экологического благополучия человека в территориальной техносфере. Для моделирования взаимодействия элементов в территориальной техносфере (человека, окружающей среды, объекта техносферы) автором предложена усовершенствованная система дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры, учитывающая их взаимное влияние.

Для проверки работоспособности модели использовано имитационное моделирование в среде *MatLAB/Simulink*.

### **Обоснование использования системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры для моделирования взаимодействия человека и объекта техносферы**

Систему дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры применяют не только для моделирования взаимодействия биологических объектов в составе экосистемы, но и для моделирования других систем, в том числе технических или смешанных [22]. При этом проводят аналогии между техническими системами и экологическими системами, в которых в качестве энергии выступает биомасса, а в технических системах – перерабатываемое сырье, материалы и пр.

Система «объект техносферы – человек» («ОТ – ЧЕЛ») является составляющей как экологических, так и технических объектов, и поэтому может быть описана системой дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры.

В основе математической модели «хищник – жертва» с точки зрения экологического благополучия человека лежит наблюдение, свидетельствующее о том, что воздействия объектов техносферы на здоровье человека не совпадают во времени: изменение здоровья «запаздывает» на некоторый интервал времени. В этом случае нелинейная цикличность зависит от принятия взвешенных управленческих решений, оценивания влияния факторов риска и оптимального управления состоянием объектов техносферы.

Математически такое взаимодействие двух видов в составе экосистемы имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (\alpha - \beta y)x, \\ \frac{dy}{dt} = (-\gamma + \delta x)y, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x$  – количественная характеристика «жертвы», т.е. элемента системы, теряющего энергию и/или вещество;  $y$  – количественная характеристика «хищника», т.е. элемента системы, приобретающего энергию и/или вещество;  $t$  – время;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – коэффициенты, отражающие особенности взаимодействия между элементами системы.

Анализ системы «ОТ – ЧЕЛ» показывает, что по отношению друг к другу элементы системы выступают как «жертва» и «хищник» соответственно: «жертва» теряет энергию и вещество в пользу «хищника», а «хищник» потребляет энергию и вещество за счет «жертвы». В результате этого обмена изменяется их качественное состояние и зависимость изменения числа «жертв» во времени может быть представлена в виде

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x, \quad (2)$$

где  $\alpha$  учитывает интенсивность воспроизводства «жертв»;  $x$  – это исходное число «жертв»;  $dx/dt$  – это скорость увеличения численности «жертв».

Имея в виду то, что если «хищники» не обеспечены питанием постоянно – они вымирают, получаем уравнение, описывающее изменение численности «хищников»:

$$\frac{dy}{dt} = \delta xy - \gamma y, \quad (3)$$

где  $d$  учитывает интенсивность гибели «хищников»;  $y$  – это исходное число «хищников»;  $dy/dt$  – это скорость увеличения численности «хищников».

Следовательно, взаимодействие «ОТ ( $x$ ) – ЧЕЛ ( $z$ )» происходит с увеличением риска для здоровья человека из-за повышения интенсивности работы объекта техносферы (одно-, двух- или трехсменная работа) и улучшение функционального состояния организма человека в результате повышения эффективности работы средозащитного оборудования.

Автором предложена модель системы «ОТ – ЧЕЛ» на основе усовершенствованной системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры и применен подход, являющийся вполне обоснованным с применением аналогий с экологическими системами. В табл. 1 установлено соответствие элементов экологической системы и территориальной техносферы.

Таблица 1

## Экологическая система – территориальная техносфера

Система	Передача	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Экологическая система	Энергетическая биомасса	Хищники	Травоядные	Растения
Территориальная техносфера	Эмиссия загрязнений	Объект техносферы	Человек	Окружающая среда

**Попарный анализ модели территориальной техносферы на основе усовершенствованной системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры**

Представление трехэлементной модели территориальной техносферы в трехмерном пространстве приведено на рис. 2.

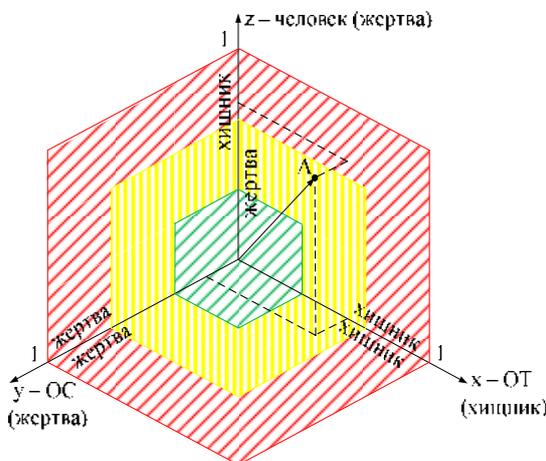


Рис. 2. Взаимодействие объектов в территориальной техносфере

Попарное взаимодействие элементов территориальной техносферы можно описать следующим образом, когда каждый элемент территориальной техносферы рассматривается по отношению к другому либо как «хищник», либо как «жертва». Среди рассматриваемых вариантов объект техносферы всегда выступает как «хищник», окружающая среда – всегда как «жертва», а человек рассматривается по отношению к объекту техносферы как «жертва», а по отношению к окружающей среде – всегда как «хищник». Но базовое предположение, лежащее в основе их взаимодействия, состоит в том, что у «жертвы» всегда есть период, когда она за счет внутренних ресурсов активно противодействует «хищнику». В связи с этим процесс взаимодействия «хищника» и «жертвы» может развиваться по трем сценариям:

- при малых воздействиях «хищника» «жертва» их полностью перерабатывает (устойчивая ситуация);
- при увеличении воздействия, учитывая исходное состояние и совокупность случайных причин, «жертва» может находиться в удовлетворительном состоянии, а может и погибнуть;
- при дальнейшем увеличении воздействия ситуация соответствует экологической катастрофе – полной деградации «жертвы» [4, 5].

Для пары «хищник – жертва» «ОТ (x) – ЧЕЛ (z)» система дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (-a_2 + b_2x)z = -a_2z + b_2xz, \\ \frac{dz}{dt} = (c_2 - d_2z)x = c_2x - d_2zx. \end{cases} \quad (4)$$

Анализируя выражение (4) как модель взаимодействия в системе «ОТ – ЧЕЛ», можно отметить, что фазовым пространством, в котором изменяется фазовый портрет и фазовая траектория системы (4), является множество вещественных чисел  $\mathbb{R}_+^2 = \{x, z : x \geq 0, z \geq 0\}$ , которое является инвариантным, так как любая траектория, начинающаяся в  $\mathbb{R}_+^2$ , не может пересечь линии  $x = 0, z = 0$ , являющиеся фазовыми кривыми.

Решая систему уравнений (4), получаем две особые точки, т.е. точки пересечения двух плоскостей в фазовом пространстве. Положения этих точек определяют возможность устойчивого сосуществования двух элементов территориальной техносферы, при котором каждый из них характеризуется набором параметров. Если значение какой-либо координаты стационарной точки отрицательно, то это означает, что этот элемент территориальной техносферы деградирует. Случай, когда обе координаты особой точки отрицательны, т.е. когда оба элемента деградируют, означает, что не учтено влияние какого-то фактора риска.

Исходные данные для попарного моделирования элементов территориальной техносферы в *MatLAB/Simulink* и физический смысл параметров системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры для системы «ОТ – ЧЕЛ» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физический смысл и значения коэффициентов  
для моделирования системы «ОТ – ЧЕЛ»

Параметры системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры	
для экосистемы	для системы «ОТ (x) – ЧЕЛ (z)»
$x$ – величина популяции хищников	$x$ – значение техногенного риска
$\gamma$ – коэффициент убыли хищников	$a_2$ – коэффициент эффективности работы средозащитного оборудования объекта техносферы (0 – 1)
$\delta$ – коэффициент рождаемости хищников	$b_2$ – коэффициент загруженности объекта техносферы (трехсменная работа – 1, двухсменная работа – 2/3, односменная работа – 1/3)
$y$ – величина популяции жертв	$z$ – значение риска для здоровья человека
$\alpha$ – коэффициент рождаемости жертв	$c_2$ – коэффициент самовосстановления человека
$\beta$ – коэффициент убыли жертв	$d_2$ – коэффициент функционального состояния организма одного человека: $d_2 = \frac{e_i}{MTD},$ где $e_i$ – измеренное (фактическое) значение $i$ -го исследуемого параметра организма человека, $MTD$ – пороговая доза исследуемого параметра организма человека в отношении эффекта, выходящего за пределы нормальных физиологических реакций
$t$ – время	

Для модели экологического благополучия человека в территориальной техносфере система уравнений (4) означает, что факторы риска, влияющие на состояние системы «ОТ – ЧЕЛ», объединяются в два интегральных

(обобщенных) управляющих параметра: коэффициент «улучшения качества»  $a$  (учитывает различные возможности развития) и коэффициент «деградации»  $c$  (учитывает различного рода ограничения).

### Результаты имитационного моделирования

Общий вид зависимостей «хищник – жертва» для системы «ОТ – ЧЕЛ» приведен на рис. 3. Схема моделирования этой системы приведена на рис. 3,а.

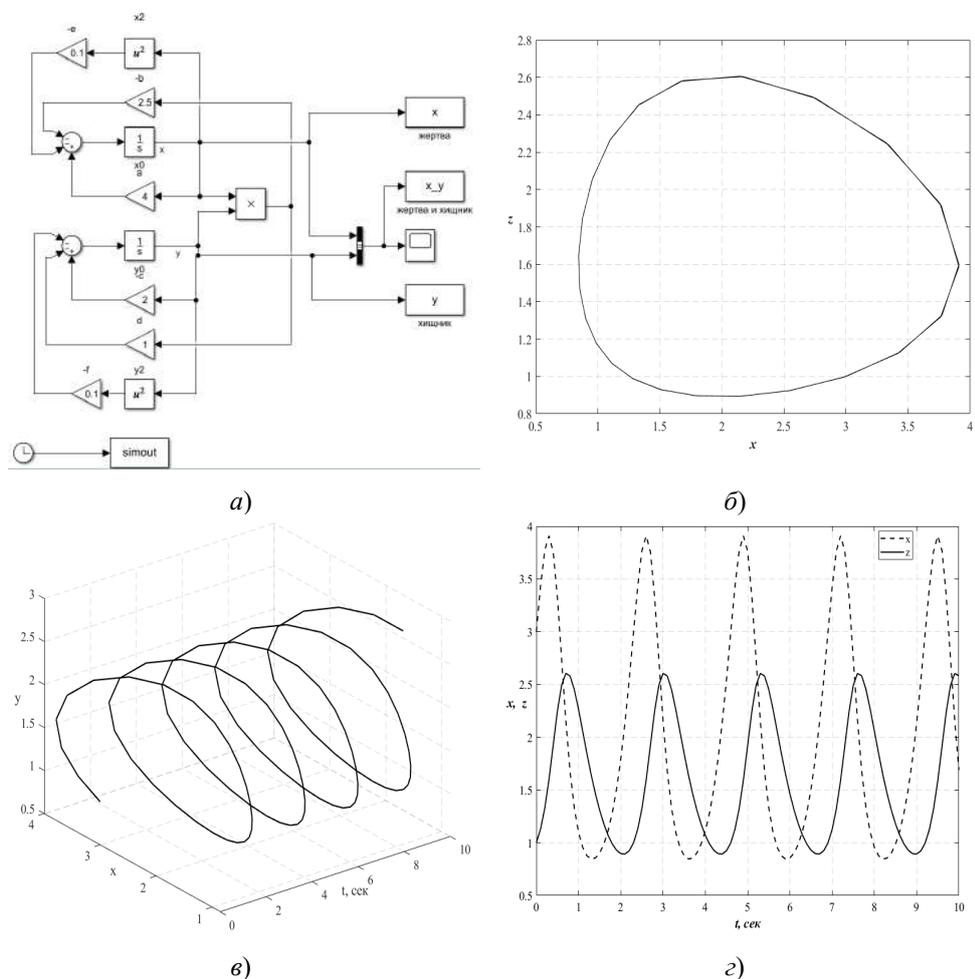


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек»: а – схема моделирования в *MATLAB/Simulink*; б – фазовый портрет; в – фазовая траектория; г – зависимость техногенного риска и риска для здоровья человека от времени моделирования

Анализ с использованием фазовой плоскости является важным методом при исследовании взаимодействия объекта техносферы и человека, описываемого системой дифференциальных уравнений 1-го порядка (4). Решение этой системы дает две устойчивые точки. Особая точка в начале координат плоскости является неустойчивой седловой точкой, так как вблизи точки  $(0,0)$  при  $x$  и  $z$ , стремящихся к единице, получается линия, близкая к гиперболе (рис. 3,б).

Ненулевая точка – это центр, что подтверждает эллиптическая замкнутая траектория, и ее координаты определяются по формулам:

$$x = \frac{a}{b}, \quad (5)$$

$$z = \frac{c}{d}.$$

Следовательно, решение системы (4) имеет колебательный характер, так как с течением времени решение в плоскости  $(x, z)$  еще раз пройдет через любую точку, которая будет принята как исходная в начальный момент времени. Колебательные решения получаются путем численного интегрирования системы (4) для выбранных начальных условий и приведены на рис. 3, в, г. Точки поворота для  $z$  всегда находятся при  $x \approx 2,55$ , а значение точки поворота для  $x$  всегда меньше значения  $z$ .

Отсюда следует, что значения риска для здоровья человека и техногенного риска находятся не в фазе, при этом изменение риска для здоровья человека «запаздывает» по отношению к техногенному риску [22].

Как видно из рис. 3, числовым решением системы (4) может быть как замкнутая фазовая траектория (б), так и спираль в виде аттрактора (в). Представленная на рис. 3, в спираль показывает, что при различном перераспределении ресурсов (финансовых, материальных), влияющем на состояние элементов территориальной техносферы, возможно улучшить экологическое благополучие человека, не ухудшив состояния объекта техносферы. Таким образом, решение системы уравнений даст возможность приблизиться к динамическому равновесию системы.

### **Выводы**

Анализ результатов попарного моделирования элементов территориальной техносферы «ОТ – ЧЕЛ» в *MATLAB/Simulink* с использованием временных функций и фазовых траекторий показал, что при любых соотношениях коэффициентов особыми точками будут:

- «центр» или «фокус», устойчивость которой необходимо дополнительно исследовать математическими методами;
- «седло», которая в этой системе неустойчива.

Исходя из этого, следует отметить, что если какое-либо состояние системы «ОТ – ЧЕЛ» удовлетворяет нас с точки зрения соотношения значений техногенного риска и риска для здоровья человека, то во всех случаях для его поддержания необходимо прикладывать усилия и затрачивать ресурсы, осуществляя лечебно-профилактические, природоохранные и технологические мероприятия.

### **Заключение**

Результаты разработки и исследования имитационной модели взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек» на основе риска с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры показали ее достоверность и возможность использования для дальнейшего исследования взаимодействия элементов в территориальной техносфере.

**Список литературы**

1. Стивенс Г., Маскареньяс М., Мэтерс К. Глобальные факторы риска для здоровья: прогресс и проблемы // Бюллетень Всемирной организации здравоохранения. Вып. 87, № 9. С. 645–732. URL: <https://www.who.int/bulletin/volumes/87/9/ru/> (дата обращения: 01.11.2022).
2. Konstantinov A. P. Ecology and health: mythical and real dangers // Ecology and life. 2012. № 7. P. 82–85.
3. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования : распоряжение Правительства РФ № 3496-р от 08.12.2021.
4. Братусь А. С., Новожилов А. С., Родина Е. В. Дискретные динамические системы и математические модели в экологии : учеб. пособие. М. : МИИТ, 2005. 139 с.
5. Трубецков Д. И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-matematicheskoy-modeli-lotki-volterry-i-shodnyh-s-ney> (дата обращения: 01.11.2022).
6. Распутина Е. И., Осипов Г. С. Математическое и имитационное моделирование динамики популяций // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 3-1. С. 28–33.
7. Сорокин А. С. Аналитическое представление решения системы уравнений Колмогорова (оценка качества системы) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskoe-predstavlenie-resheniya-sistemy-uravneniy-kolmogorova-otsenka-kachestva-sistemy> (дата обращения: 01.11.2022).
8. Беляев А. В., Первалова Т. В. Стохастическая чувствительность квазипериодических и хаотических аттракторов дискретной модели Лотки-Вольтерры // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2020. Т. 55. С. 19–32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stohasticheskaya-chuvstvitelnost-kvaziperiodicheskikh-i-haoticheskikh-attraktorov-diskretnoy-modeli-lotki-volterry> (дата обращения: 01.11.2022).
9. Дмитриев В. В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2009. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-integralnogo-pokazatelya-sostoyaniya-prirodnogo-obekta-kak-slozhnoy-sistemy> (дата обращения: 01.11.2022).
10. Ермолаева С. В., Ключков В. В., Иванов Е. О. Интегральная оценка качества окружающей среды территории Ульяновской области // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 3. С. 26–31.
11. Пономарев А. И. О методах нормирования антропогенных нагрузок на окружающую среду // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-metodah-normirovaniya-antropogennyh-nagruzok-na-okruzhayuschuyu-sredu> (дата обращения: 01.11.2022).
12. Толкачева Н. А. Сравнительная характеристика методов оценки комплексного химического загрязнения атмосферного воздуха населенных мест // Современные проблемы гигиенической науки и практики, перспективы развития : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Ю. Е. Демидчика. Минск, 2014. С. 322–325.
13. Баденко В. Л., Топаж А. Г., Якушев В. В. [и др.]. Имитационная модель агроэко-системы как инструмент теоретических исследований // Сельскохозяйственная биология. 2017. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-agroekosistemy-kak-instrument-teoreticheskikh-issledovaniy> (дата обращения: 01.11.2022).
14. Кислицын Е. В., Гоголин В. В. Имитационное моделирование экологической ситуации в мегаполисе // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 1. С. 92–106. doi:10.21685/2227-8486-2021-1-8

15. Йоргенсен С. Э. Управление озерными экосистемами : пер. с англ. М. : Агропромиздат, 1985. 160 с.
16. Лобзин Ю. В., Максимов Г. К., Уйба В. В., Максимов А. Г. Методология имитационного моделирования в экологических и эпидемиологических исследованиях заболеваемости населения // Медицинский академический журнал. 2009. Т. 9, № 2. С. 85–90. doi:10.17816/MAJ9285-90
17. Голубничий А. А., Туксина Е. А. Анализ методов и программных продуктов для имитационного моделирования экологических процессов и систем // Современная техника и технологии. 2017. № 1. URL: <https://technology.snauka.ru/2017/01/11852> (дата обращения: 01.11.2022).
18. Петрова Л. В., Баранов А. В., Царегородцев Е. И., Корепанов Д. А. Методологические аспекты имитационного моделирования экологических систем // Вестник Чувашия государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. 2014. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-aspekty-imitatsionnogo-modelirovaniya-ekologicheskikh-sistem> (дата обращения: 01.11.2022).
19. Груданов Н. А., Груданова А. А. Обзор инструментальных средств для имитационного моделирования // StudNet. 2021. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-instrumentalnyh-sredstv-dlya-imitatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 01.11.2022).
20. Трусуфус М. В., Кирпичников А. П., Якимов И. М. Моделирование в системе структурного и имитационного моделирования Simulink // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-v-sisteme-strukturnogo-i-imitatsionnogo-modelirovaniya-simulink> (дата обращения: 01.11.2022).
21. Кислицын Е. В. Конструирование имитационной модели конкурентоспособности и инновационной активности промышленного предприятия // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019. № 3. С. 5–19.
22. Безбородова О. Е. Оценка точности прогнозирования состояния территориальной техносферы в информационно-измерительной и управляющей системе обеспечения экологического благополучия человека // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 43–51.
23. Титов В. А., Вейнберг Р. Р. Анализ существующих динамических моделей на базе системы уравнений Лотки-Вольтерры «хищник–жертва» // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-2. С. 409–413.
24. Марри Д. Ж. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях : пер. с англ. М. : Мир, 1983.

### References

1. Stivens G., Maskaren'yas M., Meters K. Global health risk factors: progress and problems. *Byulleten' Vsemirnoy organizatsii zdravookhraneniya = Bulletin of the World Health Organization*. 87(9):645–732. (In Russ.). Available at: <https://www.who.int/bulletin/volumes/87/9/ru/> (accessed 01.11.2022).
2. Konstantinov A.P. Ecology and health: mythical and real dangers. *Ecology and life*. 2012;(7):82–85.
3. *Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti tsifrovoy transformatsii otrasli ekologii i prirodopol'zovaniya: rasporyazhenie Pravitel'stva RF № 3496-r ot 08.12.2021 = On approval of the 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.)
4. Bratus' A.S., Novozhilov A.S., Rodina E.V. *Diskretnye dinamicheskie sistemy i matematicheskie modeli v ekologii: ucheb. posobie = Discrete dynamical systems and mathematical models in ecology : textbook*. Moscow: MIIT, 2005:139. (In Russ.)

5. Trubetskov D.I. The phenomenon of the Lotka-Volterra mathematical model and similar ones. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika = News of universities. Applied nonlinear dynamics*. 2011;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-matematicheskoy-modeli-lotki-volterry-i-shodnyh-s-ney> (accessed 01.11.2022).
6. Rasputina E.I., Osipov G.S. Mathematical and simulation modeling of population dynamics. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017;(3-1):28–33. (In Russ.)
7. Sorokin A.S. Analytical representation of the solution of a system of Kolmogorov equations (system quality assessment). *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskoe-predstavlenie-resheniya-sistemy-uravneniy-kolmogorova-otsenka-kachestva-sistemy> (accessed 01.11.2022).
8. Belyaev A.V., Perevalova T.V. Stochastic sensitivity of quasi-periodic and chaotic attractors of the discrete Lotka-Volterra model. *Izvestiya Instituta matematiki i informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Institute of Mathematics and Informatics of Udmurt State University*. 2020;55:19–32. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/stohasticheskaya-chuvstvitelnost-kvazi-periodicheskikh-i-haoticheskikh-attractorov-diskretnoy-modeli-lotki-volterry> (accessed 01.11.2022).
9. Dmitriev V.V. Definition of an integral indicator of the state of a natural object as a complex system. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana) = Society. Wednesday. Development (Terra Humana)*. 2009;(4). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-integralnogo-pokazatelya-sostoyaniya-prirodnogo-obekta-kak-slozhnoy-sistemy> (accessed 01.11.2022).
10. Ermolaeva S.V., Klochkov V.V., Ivanov E.O. Integral assessment of the environmental quality of the territory of the Ulyanovsk region. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Vector of Science of Togliatti State University*. 2014;(3): 26–31. (In Russ.)
11. Ponomarev A.I. On methods of rationing anthropogenic loads on the environment. *Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya = Strategy of civil protection: problems and research*. 2014;(1). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-metodah-normirovaniya-antropogennykh-nagruzok-na-okruzhayushchuyu-sredu> (accessed 01.11.2022).
12. Tolkacheva N.A. Comparative characteristics of methods for assessing complex chemical pollution of atmospheric air in populated areas. *Sovremennye problemy gigenicheskoy nauki i praktiki, perspektivy razvitiya: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern problems of hygienic science and practice, prospects for development : collection of materials of the International scientific and practical conference*. Minsk, 2014:322–325. (In Russ.)
13. Badenko V.L., Topazh A.G., Yakushev V.V. et al. Simulation model of agroecosystem as a tool of theoretical research. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural biology*. 2017;(3). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-agroekosistemy-kak-instrument-teoreticheskikh-issledovaniy> (accessed 01.11.2022).
14. Kislitsyn E.V., Gogulin V.V. Simulation modeling of the ecological situation in a megalopolis. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(1):92–106. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2021-1-8
15. Yorgensen S.E. *Upravlenie ozernymi ekosistemami: per. s angl. = Management of lake ecosystems : trans. from English*. Moscow: Agropromizdat, 1985:160. (In Russ.)

16. Lobzin Yu.V., Maksimov G.K., Uyba V.V., Maksimov A.G. Methodology of simulation modeling in ecological and epidemiological studies of population morbidity. *Meditsinskiy akademicheskii zhurnal = Medical Academic Journal*. 2009;9(2):85–90. (In Russ.). doi:10.17816/MAJ9285-90
17. Golubnichiy A.A., Tuksina E.A. Analysis of methods and software products for simulation modeling of ecological processes and systems. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii = Modern equipment and technologies*. 2017;(1). (In Russ.). Available at: <https://technology.snauka.ru/2017/01/11852> (accessed 01.11.2022).
18. Petrova L.V., Baranov A.V., Tsaregorodtsev E.I., Korepanov D.A. Methodological aspects of simulation of ecological systems. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva = Bulletin of the I. Ya. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University*. 2014;(4). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-aspekty-imitatsionnogo-modelirovaniya-ekologicheskikh-sistem> (accessed 01.11.2022).
19. Grudanov N.A., Grudanov A.A. Review of tools for simulation modeling. *StudNet*. 2021;(7). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-instrumentalnyh-sredstv-dlya-imitatsionnogo-modelirovaniya> (accessed 01.11.2022).
20. Trusfus M.V., Kirpichnikov A.P., Yakimov I.M. Modeling in the system of structural and simulation modeling Simulink. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan technological university*. 2017;(8). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-v-sisteme-strukturnogo-i-imitatsionnogo-modelirovaniya-simulink> (accessed 01.11.2022).
21. Kislitsyn E.V. Designing a simulation model of competitiveness and innovation activity of an industrial enterprise. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2019;(3):5–19. (In Russ.)
22. Bezborodova O.E. Assessment of the accuracy of forecasting the state of the territorial technosphere in the information-measuring and control system for ensuring human environmental well-being. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(4):43–51. (In Russ.)
23. Titov V.A., Veynberg R.R. Analysis of existing dynamic models based on the system of Lotka-Volterra equations "predator–prey". *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2016;(8-2):409–413. (In Russ.)
24. Marri D.Zh. *Nelineynye differentsial'nye uravneniya v biologii. Lektsii o modelyakh: per. s angl. = Nonlinear differential equations in biology. Lectures on models : trans. from English*. Moscow: Mir, 1983. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Оксана Евгеньевна Безбородова**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедры  
техносферной безопасности,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: oxana243@yandex.ru

**Oksana E. Bezborodova**

Candidate of technical sciences,  
associate professor,  
head of the sub-department  
of technosphere safety,  
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 29.11.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.01.2023**

**Принята к публикации/Accepted 10.02.2023**

## РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТКАНЕЙ ПАРОДОНТА В ПОСТОПЕРАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ

С. М. Геращенко<sup>1</sup>, А. В. Демидов<sup>2</sup>, Л. А. Зюлькина<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>sgerash@mail.ru, <sup>2</sup>demidandrey@gmail.com, <sup>3</sup>larisastom@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Целью работы является разработка метода оценки состояния тканей пародонта и аппаратно-программного комплекса, реализующего данный метод. *Материалы и методы.* Обоснована возможность применения электрохимических методов оценки состояния тканей пародонта. Рассмотрена структура аппаратно-программного комплекса, основанная на джоульметрической оценке электрохимических параметров биообъекта. Подробно проанализированы преимущества и недостатки электрохимических двухэлектродных датчиков. Проведен анализ материалов для изоляции электродов. Описан алгоритм обработки полученных данных. Проведено экспериментальное исследование состояния тканей пародонта с помощью разработанной системы. В экспериментальном исследовании приняли участие 60 человек в возрасте от 19 до 45 лет. В исследуемую группу вошли люди с воспалительными заболеваниями тканей пародонта ( $n = 30$ ), контрольную составили люди со здоровой полостью рта ( $n = 30$ ). *Результаты.* В ходе проведенных экспериментальных исследований электрохимических свойств тканей пародонта методом джоульметрии с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса было выявлено, что у пациентов со здоровой полостью рта значения работы тока находятся в пределах от 0,046 до 0,137 мкДж и в среднем составляют 0,088 мкДж. Значения работы тока у пациентов с выраженными клиническими проявлениями пародонтита находятся в пределах от 0,157 до 0,351 мкДж и в среднем составляют 0,248 мкДж. *Выводы.* Таким образом, была получена взаимосвязь между электрохимическим параметром работы тока и активностью воспаления в тканях пародонта, которая характеризуется тем, что при активном воспалительном процессе значения данного параметра более высокие по сравнению с состоянием объекта в норме.

**Ключевые слова:** джоульметрические информационно-измерительные системы, диагностика, фазы воспалительного процесса, джоульметрические параметры, электрохимические и морфологические изменения, работа тока

**Для цитирования:** Геращенко С. М., Демидов А. В., Зюлькина Л. А. Разработка аппаратно-программного комплекса для неинвазивной экспресс-диагностики состояния тканей пародонта в постоперационном периоде // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 178–188. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-12

## DEVELOPMENT OF THE HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR NON-INVASIVE EXPRESS DIAGNOSTICS OF THE STATES OF PERIODONTAL TISSUES IN THE POST-OPERATIVE PERIOD

S.M. Gerashchenko<sup>1</sup>, A.V. Demidov<sup>2</sup>, L.A. Zyulkina<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>sgerash@mail.ru, <sup>2</sup>demidandrey@gmail.com, <sup>3</sup>larisastom@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The aim of the work is to develop a method for assessing the state of periodontal tissues and a hardware-software complex that implements this method. *Materials and methods.* The possibility of using electrochemical methods for assessing the state of periodontal tissues is substantiated. The structure of the hardware-software complex based on the joulemetric assessment of the electrochemical parameters of a biological object is considered. The advantages and disadvantages of electrochemical two-electrode sensors are analyzed in detail. The analysis of materials for electrode insulation was carried out. An algorithm for processing the received data is described. An experimental study of the state of periodontal tissues was carried out using the developed system. The pilot study involved 60 people aged 19 to 45 years. The study group included people with inflammatory diseases of periodontal tissues ( $n = 30$ ), the control group consisted of people with a healthy oral cavity ( $n = 30$ ). *Results.* In the course of the experimental studies of the electrochemical properties of periodontal tissues by joulemetry using the developed hardware and software complex, it was found that in patients with a healthy oral cavity, the current work values range from 0.046 to 0.137  $\mu\text{J}$  and average 0.088  $\mu\text{J}$ . The current work values in patients with severe clinical manifestations of periodontitis range from 0.157 to 0.351  $\mu\text{J}$  and average 0.248  $\mu\text{J}$ . *Conclusions.* Thus, the relationship between the electrochemical parameter of the current work and the activity of inflammation in periodontal tissues was obtained, which is characterized by the fact that with an active inflammatory process, the values of this parameter are higher compared to the state of the object in the norm.

**Keywords:** joulemetric information-measuring systems, diagnostics, phases of the inflammatory process, joulemetric parameters, electrochemical and morphological changes, work of a current

**For citation:** Gerashchenko S.M., Demidov A.V., Zyulkina L.A. Development of the hardware and software complex for non-invasive express diagnostics of the states of periodontal tissues in the post-operative period. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(1):178–188. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-12

### **Введение**

Ранняя диагностика воспалительных заболеваний тканей является актуальной проблемой в современной медицине и в частности стоматологии. Рост количества заболеваний пародонта связывают не только с наличием у пациентов красного пародонтопатогенного комплекса микроорганизмов, но и с ухудшением общесоматического здоровья популяции, связанного с ухудшением экологических показателей и ведением нездорового образа жизни, что в свою очередь приводит к ранней потере зубов [1].

В качестве клинических критериев степени тяжести пародонтита используют такие характеристики, как разрушение зубодесневого прикрепления

и степень резорбции альвеолярной кости [2]. Данные параметры не учитывают активность воспаления в тканях пародонта в момент обследования, хотя они тесно связаны с локальными патологическими процессами и изменениями, протекающими в тканях пародонта, в том числе изменение микроциркуляции. Большинство современных методов диагностики довольно сложно использовать в динамике в связи с возникновением трудностей при интерпретации результатов либо при невозможности многократного использования через короткие промежутки времени. Таким образом, ввиду широкого распространения патологий пародонтальных тканей, а также из-за отсутствия неинвазивных экспресс-методов диагностики, требуется разработка нового диагностического комплекса, лишенного данных недостатков.

Для первичной инструментальной диагностики и последующего контроля за пациентом в постоперационный период на сегодняшний день применяются методы, использующие рентгеновское излучение [3–5]. Рентгенодиагностика является золотым стандартом ввиду высокой диагностической ценности получаемой информации, однако лучевая нагрузка на пациента сильно ограничивает частоту применения данной группы методов диагностики.

Одним из направлений диагностики воспалительных заболеваний полости рта является изучение и анализ электрохимических процессов, протекающих в тканях пародонта в норме и при патологии в виде воспаления или дистрофических изменений [6, 7]. Главными достоинствами указанных методов являются неинвазивность, экспрессность, простота применяемой аппаратуры, а также безопасность для здоровья человека [8].

Исходя из вышеизложенного, для оценки состояния биологических объектов, а именно тканей пародонта, предлагается разработанный авторами аппаратно-программный комплекс для регистрации джоульметрических данных, обладающий высокой чувствительностью и информативностью.

### *Материалы и методы*

В качестве метода получения информации об электрохимических характеристиках биологических тканей был выбран джоульметрический метод. Данные, получаемые в ходе джоульметрического исследования, представляют собой изменение межэлектродного напряжения во время воздействия на биообъект импульса тока заданной силы и длительности.

Разработанный аппаратно-программного комплекса для экспресс-диагностики состояния тканей пародонта в постоперационном периоде включает в себя три компонента: специализированный электрохимический датчик, измерительную систему с микроконтроллером и электронно-вычислительное устройство (персональный компьютер) для обработки и анализа полученных данных.

Обобщенная структурная схема аппаратно-программного комплекса приведена на рис. 1.

Наиболее важной частью аппаратно-программного комплекса является специализированный электрохимический датчик, так как от его типа, конструкции и используемых материалов зависит точность измеряемых параметров. Немаловажным является то, что электроды и корпус датчика непосредственно

контактируют с исследуемым биообъектом. Таким образом, необходимо сформулировать требования, предъявляемые к датчику диагностического комплекса:

1. Конструкция датчика должна обеспечивать плотное прилегание электродов к тканям пародонта.
2. Материал электродов должен быть химически инертным проводником.
3. Материал электродов и корпуса должны иметь возможность химической или термической стерилизации.
4. Материал корпуса должен быть мягким и не вызывать дискомфорт во время исследования.

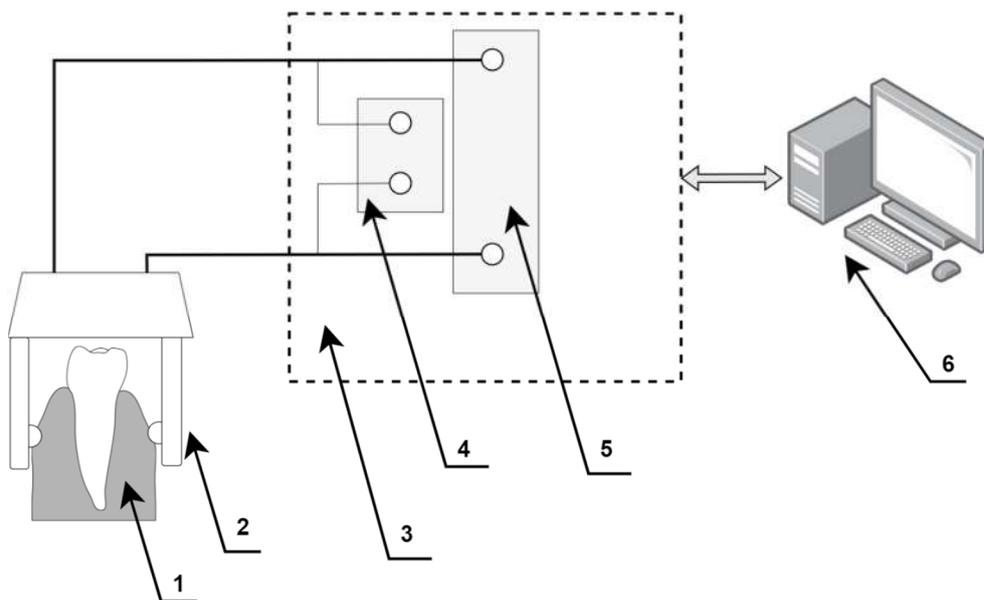


Рис. 1. Обобщенная структурная схема аппаратно-программного комплекса:  
 1 – исследуемый объект; 2 – электрохимический двухэлектродный датчик;  
 3 – измерительная система; 4 – блок измерения напряжения;  
 5 – блок генерации импульса тока; 6 – персональный компьютер

Наибольшую воспроизводимость дают четырехэлектродные системы [9], но ввиду малой площади десны не представляется возможным их использование. Оптимальными являются двухэлектродные системы. При этом один электрод должен размещаться с оральной стороны, другой с щечной. Сама конструкция датчика представляет собой зажим. Это обеспечивает более плотное прилегание электродов к тканям пародонта.

Диаметр электродов равен 5 мм, что соответствует усредненной сумме медиально-дистальных диаметров ширины коронки зуба. Небольшой размер пластины электрода также обеспечивает плотное прилегание к десне, чтобы исключить влияние поверхностных процессов.

Эскиз разработанной конструкции датчика представлен на рис. 2.

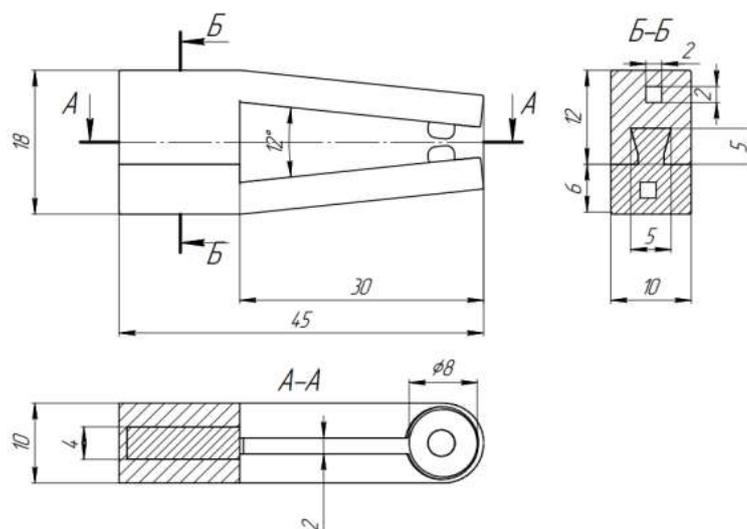


Рис. 2. Эскиз конструкции датчика

Далее рассмотрим требования к материалу электродов и корпуса датчика.

Наиболее подходящими материалами для электродов с точки зрения электрохимии являются ртуть и золото [10]. Однако использование ртути является весьма опасным ввиду ее высокой токсичности. Серебро является хорошей альтернативой и удовлетворяет поставленным требованиям, так как это инертный материал, способный выдержать как воздействие агрессивной среды ротовой полости, так и воздействие дезинфектантов [11]. Благодаря своей стабильности и малому электрическому потенциалу он позволяет свести к минимуму химические явления, которые могут вызвать артефакты сигнала, представляющие флуктуации напряжения (шумы) при отсутствии физиологических сигналов [12].

Исходя из сформулированных требований, в качестве материала корпуса датчика была выбрана пластизол на основе поливинилхлорида. В обычных условиях пластизол стабилен и представляет собой жидкую или пастообразную массу, а при нагревании пластизол быстро превращается в монолитный пластикат с высоким электрическим сопротивлением и химической стойкостью. Пластизол используется в медицине для изготовления деталей медицинских инструментов, мешков для крови, спринцовок [13]. Чистый поливинилхлорид менее предпочтителен, так как при воздействии некоторых веществ меняет свои первоначальные свойства и теряет эластичность.

Рассмотрим измерительную систему разработанного аппаратно-программного комплекса. В качестве измерительной системы был выбран потенциостат IPC Micro. Данное устройство имеет выходное напряжение  $\pm 5$  В и диапазон регулируемых потенциалов  $\pm 5$  В с максимальной скоростью регистрации 10 мс/триаду. Диапазоны выходного тока составляют от 1 нА до 10 мА. Питание осуществляется от блока питания со стабилизированным напряжением 12 В [14].

Связь измерительной системы с персональным компьютером происходит через UART-интерфейс.

На персональном компьютере с помощью специализированной программы, входящей в состав измерительной системы IPC Micro, задаются параметры подаваемого импульса (рис. 3) и регистрируется отклик биологического объекта.

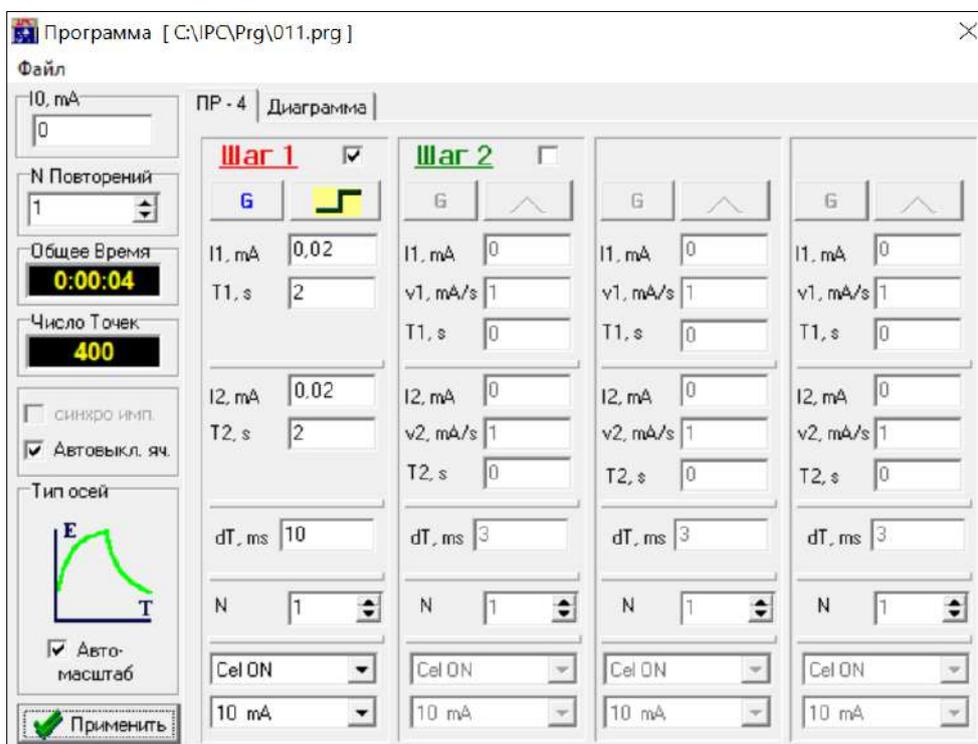


Рис. 3. Интерфейс программы для управления измерительной системой

Так как электровозбудимость пульпы интактных зубов находится в диапазоне от 0,02 до 0,06 мА [15], то амплитуда подаваемого для исследования импульса тока была выбрана на уровне 0,02 мА. Таким образом, проведение исследования при указанных параметрах не вызвало неприятных ощущений у пациентов. Длительность импульса составила 4 с, так как за указанное время протекает весь комплекс электрохимических реакций, при этом пациент может без затруднений сохранять неподвижное положение.

Реакция биообъекта на воздействие выражается в изменении межэлектродного напряжения (рис. 4). Данная кривая характеризует физиологическое состояние тканей и может быть разделена на несколько участков: заряд двойного электрического слоя (область S1 на графике), общее сопротивление электрохимической реакции (область S2 на графике) и активность электрохимической реакции (область S3 на графике). Итоговой характеристикой, которую можно интерпретировать с клинической точки зрения, является произведение площади прямоугольного треугольника ABC (характеризует активность электрохимической реакции) и силы импульса тока. Данная характеристика является работой тока, затрачиваемой на массоперенос ионов в возникающем электрическом поле.

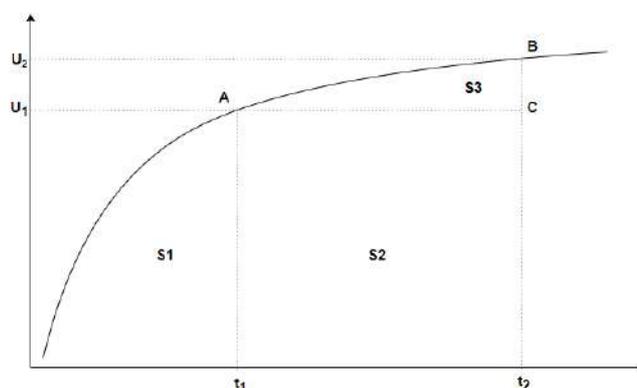


Рис. 4. Графическая интерпретация алгоритма обработки сигналов

Для анализа полученных с помощью разработанного комплекса данных и расчета работы тока авторами был разработан алгоритм. Целью обработки джоульметрического сигнала является выделение участка, характеризующего активность электрохимической реакции. Для этого исходный сигнал обрабатывается медианным фильтром для сглаживания возникающих высокочастотных помех. Затем сигнал аппроксимируется полиномом и дифференцируется. На данном этапе определяются критические точки функции, в которых закончилось экспоненциальное увеличение значений напряжения (характеризует процесс заряда двойного электрического слоя) и начались линейные изменения. По найденным критическим точкам строится прямоугольный треугольник. Схема алгоритма представлена на рис. 5.

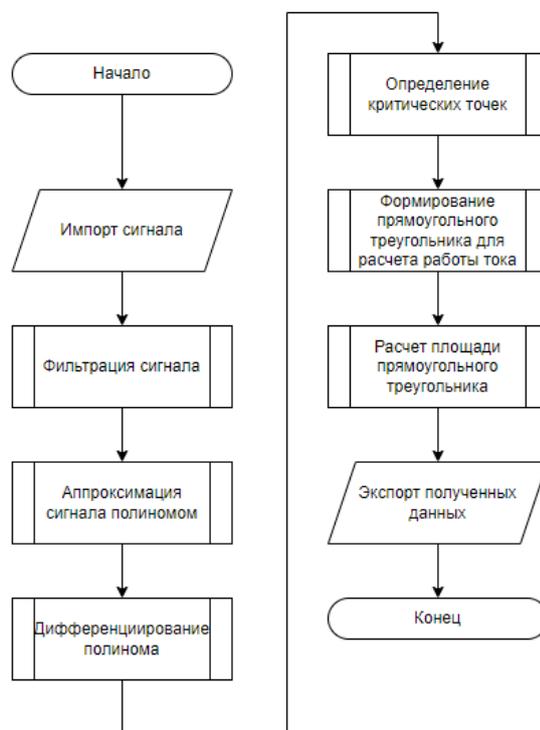


Рис. 5. Алгоритм обработки джоульметрического сигнала

Площадь полученного треугольника характеризует активность электрохимических реакций исследуемого биообъекта. Данную характеристику затем можно интерпретировать с клинической точки зрения. На основе вышеописанного алгоритма авторами была разработана программа в среде Matlab для обработки получаемых данных и расчета работы тока.

В ходе проведенных экспериментальных исследований электрохимических свойств тканей пародонта методом джоульметрии было исследовано 60 пациентов. Пациенты были разделены на две группы в зависимости от стоматологического статуса: 1-я – контрольная группа пациентов со здоровым состоянием полости рта; 2-я – исследуемая группа пациентов с клиническими проявлениями пародонтита.

В контрольную группу вошли 30 пациентов в возрасте от 19 до 45 лет с удовлетворительным гигиеническим состоянием полости рта. В исследуемую группу включены 30 пациентов в возрасте от 19 до 45 лет с диагнозом пародонтит средней степени тяжести.

### Результаты

Был разработан аппаратно-программный комплекс для неинвазивной экспресс-диагностики и с его помощью проведено исследование состояния тканей пародонта у различных пациентов.

График распределения значений работы тока исследуемой и контрольной групп представлены на рис. 6.

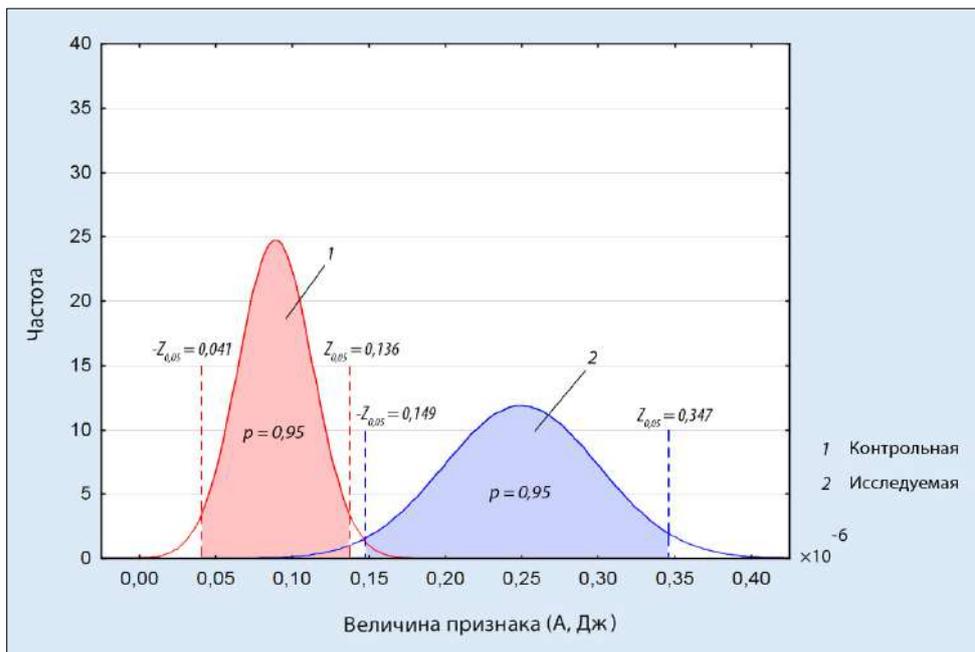


Рис. 6. График распределения значений работы тока

По результатам проведенного экспериментального исследования было выявлено, что значение параметра работы тока в тканях пародонта, находящихся в состоянии «норма», находятся в пределах от 0,046 до 0,137 мкДж

и в среднем составляют 0,088 мкДж. Значения параметра работы тока в тканях при наличии воспалительного процесса, вследствие активации биологических процессов, находятся в пределах от 0,157 до 0,351 мкДж и в среднем составляют 0,248 мкДж, что значительно превышает среднее значение этого показателя в норме.

### **Выводы**

По результатам проведенного исследования была выявлена взаимосвязь между электрохимическим параметром работы тока и активностью воспаления в тканях пародонта, которая характеризуется тем, что при активном воспалительном процессе значения данного параметра более высокие по сравнению с состоянием объекта в норме. Полученные с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса данные позволяют сделать вывод о возможности создания системы экспресс-распознавания состояния тканей пародонта. Разработанная конструкция двухэлектродного датчика позволяет получать воспроизводимые результаты за счет минимизации влияния процессов, происходящих на границе «электрод – исследуемая среда», на результаты исследования.

### **Список литературы**

1. Маланьин И. В. Современные методы лечения и профилактики заболеваний пародонта : учеб.-метод. пособие. Краснодар : Кубанская научная школа стоматологии, 2012. 144 с.
2. Янушевич О. О., Дмитриева Л. А. Пародонтология: национальное руководство. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2018. 752 с.
3. Бурхонова Н. Д. К вопросу заболевания пародонта // *Мировая наука*. 2019. Т. 4, № 25. С. 217–220.
4. Вольф Г. Ф., Хэссэл Т. М. Пародонтология. Гигиенические аспекты. М. : МЕД-пресс-информ, 2014. 360 с.
5. Иванов П. В., Зюлькина Л. А., Удальцова Е. В. [и др.]. Современные методы диагностики воспалительных заболеваний пародонта (литературный обзор) // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2020. № 6. С. 194–200.
6. Иванов П. В., Зюлькина Л. А., Капралова Г. А. [и др.]. Исследование взаимосвязи джоульметрических параметров с воспалительными изменениями тканей пародонта // *Биология и медицина*. 2016. № 2. С. 1–4.
7. Almeida M. O., Maltarollo V. G., Shim H. [et al.]. Medicinal electrochemistry: Integration of electrochemistry, medicinal chemistry and computational chemistry // *Current Medicinal Chemistry*. 2014. № 20. P. 2266–2275.
8. Demidov A. V., Konovalova E. V., Zyulkin L. A., Gerashchenko S. M. Development of the Sensor for Joule Metric Assessment of Bone Regenerate Formation // *Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2022. P. 52–54.
9. Newman J., Balsara N. P. *Electrochemical systems*. John Wiley & Sons, 2021. 567 с.
10. Несмеянов Н. П., Дузенко К. К., Литвинов А. Ю. [и др.]. Обзор электродов, применяемых в электрохимии // *Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов*. 2019. С. 261–265.
11. Abdulbari H. A., Basheer E. A. M. Electrochemical biosensors: electrode development, materials, design, and fabrication // *ChemBioEng Reviews*. 2017. № 2. P. 92–105.

12. Белова В. С. Электрохимическая модификация поверхности серебряных электродов для медицинской электромиографической диагностики : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022. 131 с.
13. Лось Д. М., Шаповалов В. М., Зотов С. В. Применение полимерных материалов для изделий медицинского назначения // Проблемы здоровья и экологии. 2020. № 2. С. 5–13.
14. Потенциостат IPC Micro. URL: <http://volta.spb.ru/catalog/potentsiostat/potentsiostat-serii-ipc/72-potentsiostat-ipc-micro> (дата обращения: 12.05.2023).
15. Николаева А. И., Петрова Е. В. Электроодонтодиагностика : учеб. пособие. М. : МЕДпресс-информ, 2014. 40 с.

### References

1. Malan'in I.V. *Sovremennye metody lecheniya i profilaktiki zabolevaniy parodonta: ucheb.-metod. posobie = Modern methods of treatment and prevention of periodontal diseases : educational and methodical manual*. Krasnodar: Kubanskaya nauchnaya shkola stomatologii, 2012:144. (In Russ.)
2. Yanushevich O.O., Dmitrieva L.A. *Parodontologiya: natsional'noe rukovodstvo = Periodontology: national leadership*. Moscow: GEOTAR-Media, 2018:752. (In Russ.)
3. Burkhonova N.D. On the issue of periodontal disease. *Mirovaya nauka = World Science*. 2019;4(25):217–220. (In Russ.)
4. Volf G.F., Khessel T.M. *Parodontologiya. Gigienicheskie aspekty = Periodontology. Hygienic aspects*. Moscow: MEDpress-inform, 2014:360. (In Russ.)
5. Ivanov P.V., Zyul'kina L.A., Udaltsova E.V. et al. Modern methods of diagnosis of inflammatory periodontal diseases (literary review). *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2020;(6):194–200. (In Russ.)
6. Ivanov P.V., Zyul'kina L.A., Kapralova G.A. et al. Investigation of the relationship of joulemetric parameters with inflammatory changes in periodontal tissues. *Biologiya i meditsina = Biology and Medicine*. 2016;(2):1–4. (In Russ.)
7. Almeida M.O., Maltarollo V.G., Shim H. et al. Medicinal electrochemistry: Integration of electrochemistry, medicinal chemistry and computational chemistry. *Current Medicinal Chemistry*. 2014;(20):2266–2275.
8. Demidov A.V., Konovalova E.V., Zyul'kina L.A., Gerashchenko S.M. Development of the Sensor for Joule Metric Assessment of Bone Regenerate Formation. *Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. 2022:52–54.
9. Newman J., Balsara N.P. *Electrochemical systems*. John Wiley & Sons, 2021:567.
10. Nesmeyanov N.P., Duzenko K.K., Litvinov A.Yu. et al. Review of electrodes used in electrochemistry. *Energoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov = Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials*. 2019:261–265. (In Russ.)
11. Abdulbari H.A., Basheer E.A.M. Electrochemical biosensors: electrode development, materials, design, and fabrication. *ChemBioEng Reviews*. 2017;(2):92–105.
12. Belova V.S. Electrochemical modification of the surface of silver electrodes for medical electromyographic diagnostics. PhD dissertation. Ivanovo, 2022:131. (In Russ.)
13. Los' D.M., Shapovalov V.M., Zotov S.V. Application of polymer materials for medical devices. *Problemy zdorov'ya i ekologii = Health and environmental issues*. 2020;(2):5–13. (In Russ.)
14. *Potentsiostat IPC Micro*. (In Russ.). Available at: <http://volta.spb.ru/catalog/potentsiostat/potentsiostat-serii-ipc/72-potentsiostat-ipc-micro> (accessed 12.05.2023).
15. Nikolaeva A.I., Petrova E.V. *Elektroodontodiagnostika: ucheb. posobie = Electro-dental diagnostics : textbook*. Moscow: MEDpress-inform, 2014:40. (In Russ.)

***Информация об авторах / Information about the authors***

**Сергей Михайлович Геращенко**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры медицинской  
кибернетики и информатики  
Медицинского института,  
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  
of Medical Institute,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Андрей Владимирович Демидов**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: demidandrey@gmail.com

**Andrey V. Demidov**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Лариса Алексеевна Зюлькина**

доктор медицинских наук, доцент,  
профессор кафедры стоматологии  
Медицинского института,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: larisastom@yandex.ru

**Larisa A. Zyulkina**

Doctor of medical sciences, associate  
professor, professor of the sub-department  
of dentistry of Medical Institute,  
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 20.12.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 09.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 10.03.2023**