

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

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (52)

2024

СОДЕРЖАНИЕ

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

<i>Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И.</i> ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОМПАНИЕЙ	5
<i>Ганявин В. А., Михайлиди Д. Х., Еремин Д. П.</i> К ВОПРОСУ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ РАЗРАБОТКИ ПАРТНЕРСКОГО СЕРВИСА УЧЕТА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ И ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	17
<i>Коростышевская Е. М., Новиков А. В., Рединская М. В.</i> ЦЕНТР КЛАСТЕРНОГО РАЗВИТИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ КЛАСТЕРНОЙ ПОЛИТИКИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА	28
<i>Чернецова Н. С.</i> УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ФУНКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНТЕРЕСОВ	39

РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Кревский М. И., Бождай А. С. ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ (PROCESS MINING)	53
Тихов С. В. ЗАДАЧА ДИФРАКЦИИ ТЕ-ВОЛНЫ НА ДВУМЕРНОМ СЛОЕ, ПОКРЫТОМ ГРАФЕНОМ, С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ.....	73
Хрящев В. В., Приоров А. Л., Котов Н. В., Малыгин К. И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ПОПИКСЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПАТОЛОГИЙ В КОЛОНОСКОПИИ	86
Иванов В. В., Акишина Е. П., Приказчикова А. С. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ КРЕДИТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.....	98
Кривоногов Л. Ю., Левин С. Ф., Иномбоев И. С., Папшев Д. В. СВЕРТОЧНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ	108
Шептунов М. В. ОБ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА ОТ МОДЕРНИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ПЕРЕСТРАХОВАНИИ.....	122
Печалин Н. Д. ПРИНЦИПЫ, МЕХАНИЗМЫ И ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ РИСКОВ И КОРПОРАТИВНЫХ ПРОЦЕДУР	133

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

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 4 (52)

2024

CONTENT

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

Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I.

DIGITAL TWINS AS TOOLS FOR INCREASING COMPANY
MANAGEMENT EFFICIENCY 5

Ganyavin V.A., Mikhaylidi D.Kh., Eremin D.P.

ON THE ISSUE OF CONCEPTUAL DEVELOPMENT
OF A PARTNERSHIP SERVICE FOR ACCOUNTING
RECYCLED RESOURCES AND RAW MATERIALS
FOR THE STATE INDUSTRIAL INFORMATION SYSTEM 17

Korostyshevskaya E.M., Novikov A.V., Redinskaya M.V.

THE CLUSTER DEVELOPMENT CENTER AS A TOOL
FOR IMPLEMENTING CLUSTER POLICY IN ST. PETERSBURG 28

Chernetsova N.S.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ECONOMIC SYSTEMS
AS A FUNCTION OF THE SYSTEM OF ECONOMIC INTERESTS..... 39

SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

Krevskiy M.I., Bozhday A.S.

REVIEW AND ANALYSIS OF MODERN SCIENTIFIC
AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR MANAGING
ORGANIZATIONAL PROCESSES (PROCESS MINING)..... 53

Tikhov S.V.

SCATTERING PROBLEM OF TE-WAVE
ON A TWO-DIMENSIONAL LAYER, COVERED
WITH GRAPHENE, ACCOUNTING FOR THE NONLINEARITY 73

Khryashchev V.V., Priorov A.L., Kotov N.V., Malygin K.I.

USING DIGITAL IMAGE PROCESSING ALGORITHMS
IN THE TASK OF PIXEL-BY-PIXEL DETECTION
OF PATHOLOGIES IN COLONOSCOPY 86

Ivanov V.V., Akishina E.P., Prikazchikova A.S.

MATHEMATICAL MODELS DEVELOPMENT
FOR CREDIT ORGANIZATIONS STATE ANALYSIS
BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS 98

Krivosnogov L.Yu., Levin S.F., Inomboev I.S., Papshev D.V.

A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK
FOR ECG SIGNALS CLASSIFICATION 108

Sheptunov M.V.

UPON IMPROVING THE CRITERION OF EVALUATION
OF THE EFFECT FROM MODERNIZATION OF AUTOMATED
RISK MANAGEMENT SYSTEMS IN REINSURANCE 122

Pechalin N.D.

PRINCIPLES, MECHANISMS AND PROJECT MANAGEMENT TOOLS
AT AGRICULTURAL ENTERPRISES UNDER CONDITIONS
OF RISKS AND CORPORATE PROCEDURES..... 133

Раздел 1

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Section 1

MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 658
doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-1

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОМПАНИЕЙ

А. Д. Столяров¹, В. В. Гордеев², В. И. Абрамов³

^{1,2,3} Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
¹mr.alexst@gmail.com, ²v.gordeev@aerolabs.aero, ³viabramov@mephi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях быстрых изменений социально-экономической среды цифровые двойники позволяют компаниям поддерживать более оперативное, продуманное и экономически выгодное принятие решений. Они дают производителям возможность глубже понять сложные физические системы и производственные операции, оптимизировать планирование производства или смоделировать сценарии «что будет, если», чтобы понять, например, влияние выхода новых продуктов. Технология цифровых двойников развивается с высокой скоростью, поэтому цель данной работы заключается в исследовании и обосновании их роли как инструментов повышения эффективности компаний. *Материалы и методы.* Проводятся анализ и оценка существующих в мировой и отечественной практике подходов и методов использования цифровых двойников для повышения эффективности управления компаниями в современной изменчивой социально-экономической среде. При решении поставленных задач были применены общенаучные методы исследования: анализ, синтез и обобщение с применением библиометрического анализа в наукометрических базах Scopus и eLIBRARY. *Результаты.* Показано, что цифровые двойники играют ключевую роль в повышении эффективности управления компаниями в различных областях, представлены конкретные способы, с помощью которых цифровые двойники способствуют повышению эффективности управления. Приводятся характерные особенности практического использования цифровых двойников в промышленной сфере на всех этапах жизненного цикла. *Выводы.* В мире, где умение находить и принимать своевременные эффективные решения может обеспечить конкурентное преимущество или облегчить процесс адаптации к переменам в экономике, цифровые двойники могут стать незаменимыми инструментами для решения проблем, связанных с повышением эффективности бизнеса.

© Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: цифровые двойники, цифровая трансформация, цифровые технологии, эффективное управление компанией, рекомендательные сервисы, интернет вещей, машинное обучение

Для цитирования: Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И. Цифровые двойники как инструменты повышения эффективности управления компанией // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 5–16. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-1

DIGITAL TWINS AS TOOLS FOR INCREASING COMPANY MANAGEMENT EFFICIENCY

A.D. Stolyarov¹, V.V. Gordeev², V.I. Abramov³

^{1, 2, 3} National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
¹ mr.alexst@gmail.com, ² v.gordeev@aerolabs.aero, ³ viabramov@mephi.ru

Abstract. Background. In a rapidly changing socio-economic environment, digital twins provide companies with the ability to support faster, smarter and more cost-effective decision making. They enable manufacturers to gain a deeper understanding of complex physical systems and manufacturing operations, optimize production planning, or simulate what-if scenarios to understand, for example, the impact of new product launches. The technology of digital twins is developing at a high speed, and therefore the purpose of this work is to study and justify their role as tools for improving the efficiency of companies. *Materials and methods.* The purpose of this study was to analyze and evaluate the approaches and methods of using digital twins existing in world and domestic practice to improve the efficiency of company management in the modern changing socio-economic environment, therefore, in solving the problems, general scientific research methods were applied: analysis, synthesis and generalization using bibliometric analysis in scientometric databases Scopus and eLibrary. *Results.* It is shown that digital twins play a key role in improving the management efficiency of companies in various fields, and specific ways in which digital twins contribute to improving management efficiency are presented. The characteristic features of the practical use of digital twins in the industrial sphere at all stages of the life cycle are given. *Conclusions.* In a world where the ability to find and make timely, effective decisions can provide a competitive advantage or ease the process of adapting to changes in the economy, digital twins can become indispensable tools for solving problems associated with improving business performance.

Keywords: digital twins, digital transformation, digital technologies, effective company management, recommendation services, Internet of things, machine learning

For citation: Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I. Digital twins as tools for increasing company management efficiency. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):5–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-1

Введение

С приходом четвертой промышленной революции и вступлением в шестую технологическую эру, когда организациям приходится работать в обстановке стремительного развития современного бизнеса, жесткой конкуренции и постоянно меняющейся динамики, важность эффективного управления предприятием становится очевидной. Способность адаптироваться, оптимизировать свою деятельность и принимать обоснованные решения в режиме

реального времени имеет решающее значение для устойчивого успеха. Традиционные методы управления часто не справляются со сложностью современного бизнеса, поэтому для обеспечения его устойчивости и жизнеспособности необходимы инновационные решения. Исследования McKinsey показывают, что руководители динамично развивающихся организаций демонстрируют в 2,1 раза большую операционную устойчивость, в 2,5 раза более высокие финансовые показатели, в 3,0 раза больший рост и в 4,8 раза больше инноваций, чем их коллеги, развивающиеся медленнее [1].

Следует отметить, что распространение цифровых технологий расширило возможности и скорости обмена данными и знаниями [2], и это, в свою очередь, создает новые требования для обеспечения конкурентоспособности в управлении компаниями. Современные архитектуры систем способны обрабатывать большие объемы данных, что позволяет гибко масштабировать рабочую нагрузку [3].

Чтобы обеспечить принятие быстрых, но в то же время и эффективных управленческих решений, компании все больше ориентируются на цифровое управление, которое использует алгоритмические протоколы для автоматизации контроля, координации, стимулирования и доверия [4]. Цифровое управление затрагивает фундаментальные организационные вопросы, такие как повышение программируемости задач для улучшения управления процессами, автоматизация распределения и обмена задачами для облегчения координации, создание стимулов с помощью динамических показателей и обеспечение прозрачности транзакций, необходимой для доверия. Эти технологические решения являются важными предшественниками новых бизнес-моделей, основанных на данных, которые требуют регулирования владения, хранения, передачи, доступа и использования данных за пределами индивидуальных, функциональных и организационных границ.

Информационные средства и технологии стали предметом широкой практики во всех областях экономики и государственного управления. Например, технологии и устройства интернета вещей стали широко внедряться для сбора различных данных, получаемых в течение жизненного цикла продукта [5], облачные технологии обеспечивают управление данными [6], а искусственный интеллект служит для интеллектуального анализа данных и создания ценности / добавленной стоимости [7]. Приближается эра экономики данных, и в России Правительство по поручению президента РФ готовит новый национальный проект «Экономика данных», который должен быть принят в 2024 г. [8]. Термин «экономика данных» относится к системе, в которой данные являются не просто побочным продуктом бизнеса, а рассматриваются как ценный актив. Это изменение парадигмы обусловлено преобразующей силой и потенциалом данных и подчеркивает их роль в качестве катализатора инноваций, эффективности и конкурентных преимуществ во всех отраслях.

Постоянно растущая цифровизация практически всех аспектов повседневной жизни и расширяющиеся возможности сбора, хранения, передачи, анализа и оценки данных привели к тому, что все больше надежд возлагается на концепцию «цифровых двойников» (ЦД) [9]. Конвергенция цифровых технологий породила этот инновационный подход, предлагающий зеркальную цифровую копию физических активов, процессов или систем. В этом контексте «цифровой двойник» можно рассматривать как важнейшую технологию,

обеспечивающую будущее развитие и прогресс. С момента своего появления в 2003 г. эта концепция вызывает неизменный интерес, а количество ежегодных публикаций начиная с 2017 г. растет в геометрической прогрессии [10].

Гривз и Викерс [11] первоначально сформулировали определение цифрового двойника таким образом: «цифровая информационная конструкция физической системы как независимая сущность». «Двойник» в этом контексте подразумевает, что цифровая информация будет связана с физической системой на протяжении всего ее жизненного цикла. Применение этой концепции к производству позволяет производителям создавать соответствующие целям цифровые представления своих производственных систем и процессов, используя собранные данные и информацию для обеспечения анализа, принятия решений и контроля для определенной цели и объема. Под цифровым двойником понимается информационная структура модели физического объекта. Предназначение цифрового двойника – предоставить такую же или более точную, качественную, полную и достоверную информацию, чем та, которая может быть получена при физическом присутствии объекта. Ключевое предположение заключается в том, что тип, степень детализации и объем информации, содержащейся в цифровом двойнике, определяются вариантами использования [12]. Успех модели цифрового двойника будет зависеть от ценности, которую она создает как для производителей, так и для пользователей их продуктов [12]. Цифровые двойники активно применяются не только в производстве, но и в таких сферах, как сельское хозяйство [13], управление энергетикой [14] и регионами [15]. Теория цифрового двойника выходит за рамки традиционного моделирования, поскольку использует данные и возможности подключения в режиме реального времени, позволяя организациям получить беспрецедентное представление о производительности и поведении физических активов или процессов, что дает возможность более глубокого понимания, чем при классических методах мониторинга.

Актуальность этой работы заключается в том, что в динамичной, неопределенной социально-экономической среде цифровые двойники дают компаниям возможность поддерживать более оперативное, умное и экономически рациональное принятие решений, способствовать более глубокому пониманию сотрудниками предприятий сложных физических систем и производственных операций и технологических процессов, оптимизировать планирование производства или моделировать сценарии «что-если», например, для понимания последствий запуска новых продуктов. Технология цифровых двойников развивается интенсивно, и недавний опрос руководителей высшего звена McKinsey показал, что большинство из них уже наблюдают практическое применение цифровых двойников в своих компаниях [16].

Технологии цифровых двойников быстро развиваются, и в числе современных тенденций – интеграция с искусственным интеллектом и машинным обучением, визуализация и взаимодействие в реальном времени, разработка интуитивно понятных интерфейсов, позволяющих работать с цифровыми двойниками пользователям даже без специальной подготовки, а внедрение технологии блокчейна позволяет создавать децентрализованные цифровые двойники, обеспечивая прозрачность, безопасность и надежность данных, поэтому надо понимать перспективность этих технологий для повышения конкурентоспособности компаний.

Цель данной работы – выявить и обосновать возможные пути повышения эффективности компаний с помощью цифровых двойников. Научная новизна работы заключается в том, что на основе комплексного анализа использования цифровых двойников в различных сферах деятельности определены пути повышения эффективности предприятий с учетом специфики разных этапов жизненного цикла продукта.

Материалы и методы

Задача данного исследования – проанализировать и оценить современные подходы и методы использования цифровых двойников в мировой и отечественной практике для повышения качества корпоративного управления в условиях современной турбулентной социально-экономической среды. Для решения поставленной задачи применялись общенаучные методы исследования: поиск, анализ, систематизация, выявление тенденций и обобщение данных. Библиометрический подход с привлечением баз данных Scopus и eLIBRARY позволил провести структурированный обзор и критический анализ научных публикаций зарубежных и отечественных авторов, содержащих материалы по теме настоящего исследования.

Результаты и обсуждение

Современная социально-экономическая среда подвержена частым и резким колебаниям, вызванным высокими темпами технологических разработок, проблемами глобализации, динамикой покупательского восприятия и т.д. Бурное развитие технологий чревато устареванием существующих бизнес-моделей, и компаниям неизбежно придется адаптироваться к этим тенденциям, иначе они рискуют оказаться на грани потери собственной конкурентоспособности. В результате развития глобальных связей открываются все более широкие рыночные возможности, но при этом ужесточается проблема конкуренции, и поэтому компаниям становится труднее ориентироваться в многообразии рынков, справляться со сложностями регулирования и решать проблемы, связанные с цепочками поставок, а изменения потребительских предпочтений заставляют применять инновации и проявлять особую гибкость и изобретательность.

Цифровые двойники представляют собой революционную концепцию в управлении сложными системами, предлагая целостное копирование физических объектов в режиме реального времени в цифровой среде. Следует при этом различать три типа цифровых репликаций [17]:

- первый тип – это цифровая модель, характеризующаяся необходимостью ручной связи между реальным и цифровым двойниками;
- второй тип – это цифровая тень, при которой связь с физического объекта на цифровой осуществляется автоматически, но обратный путь, с цифрового на физический, необходимо выполнять вручную;
- третий тип – это цифровой двойник, который характеризуется автоматизированным переходом от реального объекта к цифровому, и, наоборот, в этом случае цифровая модель может взаимодействовать с реальной и изменять параметры и состояния без необходимости вмешательства человека.

В основе концепции лежит создание виртуального подобия, которое отражает динамику, особенности процессов и состояний его физического оригинала [18]. По данным работы [19], разработанная модель должна поддерживать возможность проведения сценарных испытаний и анализа влияния изменений. В этом случае цифровой двойник служит динамичным и оперативным инструментом для мониторинга, аналитической оценки и оптимизации различных аспектов системы и использования активов.

В работе [20] предложена квалификация ЦД по четырем уровням цифровой зрелости:

- доцифровой двойник: виртуальный прототип, созданный раньше своего физического аналога, его цель – оптимизировать систему и предупредить появление технических проблем или рисков до того, как будет создана физическая система;

- цифровой двойник: соответствует «классической» версии ЦД, где виртуальная модель получает данные из физической системы и обновляет свою модель в соответствии с полученными данными, при этом взаимодействие между виртуальной и физической системами является двунаправленным, что позволяет цифровому двойнику использовать полученные данные и модели виртуальной системы для оптимизации производительности физического аналога;

- адаптивный цифровой двойник: в дополнение к свойствам цифрового двойника он предоставляет возможность изучать (алгоритм машинного обучения) предпочтения и приоритеты пользователей и реинвестировать их, создавая интерфейс, чувствительный к этим критериям;

- интеллектуальный цифровой двойник: предоставляет все функции адаптивного цифрового двойника, обеспечивая не только внутренние адаптивные возможности, но и учитывая другие объекты, сосуществующие в среде.

В работе [21] представлен эффективный метод оптимизации процесса точечной сварки с точки зрения качества геометрических характеристик шва. Результаты показывают, что предложенный метод позволяет на 60–80 % сократить время процесса при оптимальном уровне качества сварных швов. Интересный опыт повышения производительности и снижения затрат с использованием цифрового двойника реализован в строительстве для логистических процессов, которые обычно характеризуются весьма ограниченной прозрачностью и неэффективной организацией [22]. Достигнутые эффекты: оперативное планирование пополнения запасов в режиме реального времени, прогнозирование сроков пополнения запасов, полная доступность эксплуатационных данных, улучшение уровня обслуживания и более высокая удовлетворенность клиентов. Руководство имеет возможность принятия решений в режиме реального времени, и такая информация, в частности, может быть использована для переговоров о гибких ценах.

Анализ приведенных выше работ показывает, что цифровые двойники имеют ключевое значение как средство достижения высокой эффективности управления организацией в различных областях. На основе этих выводов в табл. 1 представлены конкретные способы, с помощью которых цифровые двойники оказывают влияние на рост эффективности управленческой деятельности.

Таблица 1

Способы использования цифровых двойников
для повышения эффективности компаний

Способы использования	Описание и преимущества
Принятие решений на основе данных	Предоставление и поддержка огромных объемов данных в режиме реального времени: анализ данных позволяет руководству компании принимать обоснованные решения, повышая гибкость и адаптируемость [17]
Совершенствование качества обслуживания клиентов	Обеспечение персонализированного обслуживания клиентов: компании могут адаптировать продукты или услуги на основе предпочтений клиентов, повышая удовлетворенность и лояльность клиентов [21]
Предиктивное обслуживание	Мониторинг и контроль состояния физических ресурсов и активов: предиктивная аналитика, основанная на данных цифровых двойников, помогает прогнозировать потребности в обслуживании, сокращая время простоев и оптимизируя производительность активов [22]
Оптимизация операционных и технологических процессов	Моделирование и анализ операционных и технологических процессов: данные оптимизации обеспечивают более высокий уровень производственного процесса и использования ресурсов [20, 21]
Оптимизация цепочки поставок	Обеспечение прозрачности всей цепочки поставок: компании могут оптимизировать уровень запасов, упорядочить и упростить логистику, поднять показатели работы всей цепочки поставок [22]
Моделирование для принятия решений	Разработка сценариев развития событий: лица, принимающие решения, имеют возможность оценивать влияние различных стратегий, что повышает точность решений и минимизирует риски [19]
Контроль показателей качества	Контроль показателей качества выпускаемой продукции в режиме реального времени: раннее обнаружение дефектов или отклонений позволяет немедленно предпринять корректирующие действия, обеспечивая более высокое качество продукции и сокращая отходы [18]
Дистанционный мониторинг и контроль	Удаленный мониторинг и контроль операций: компании могут управлять активами и процессами на расстоянии, повышая операционную гибкость и снижая необходимость физического присутствия [18]
Снижение рисков	Проведение комплексной оценки рисков: компании могут заранее выявлять и снижать потенциальные риски, обеспечивая безопасность операций и сводя к минимуму сбои [21]
Обучение и развитие навыков	Поддержка среды обучения для сотрудников: компании могут повышать квалификацию сотрудников за счет актуального практического обучения, сокращения сроков подготовки и повышения операционной эффективности [22]

Сложные инженерные системы, такие как самолеты, корабли и ветряные турбины, рассчитаны на эксплуатацию в течение десятилетий в жестких условиях, и в процессе их работы неизбежно ухудшение характеристик, что может привести к отказу и высоким затратам на обслуживание. Для повышения точности и надежности прогнозирования и управления техническим состоянием

инженерных систем и сложного оборудования также предлагается использовать цифровые двойники [23]. Они применяются для контроля состояния оборудования, выполнения диагностики и прогнозирования, а также разработки правил проектирования технического обслуживания [24]. Для таких систем цифровые двойники необходимо использовать на четырех этапах жизненного цикла продукта: создание, сборка, эксплуатация и утилизация [12]. Особенности применения цифровых двойников на разных этапах жизненного цикла представлены в табл. 2 [25].

Таблица 2

Применение цифровых двойников на разных этапах жизненного цикла

Этап проектирования	Стадия производства (операционное управление)	Стадия производства (планирование)	Этап обслуживания	Стадия завершения эксплуатации / утилизация
Итерационная оптимизация	Мониторинг в режиме реального времени	Прогнозирование производительности	Предиктивное обслуживание	Требуется исследований
Обеспечение целостности данных	Контроль производства	Взаимодействие человек – машина	Диагностика и обнаружение дефектов	
Виртуальная оценка и проверка	Управление активами	Оценка процесса и оптимизация	Мониторинг состояния	
	Планирование производства		Прогнозирование эффективности	
			Виртуальное тестирование	

Важно отметить, что на всех этапах жизненного цикла продукта цифровые двойники позволяют повысить качество управленческих решений с использованием многих критериев [26] и анализа их чувствительности ко многим факторам [27], что особенно важно в условиях изменяющейся внешней среды. Современное программное обеспечение для многокритериальной оптимизации позволяет проанализировать миллионы гипотетических управленческих и производственных решений с помощью цифрового двойника и выбрать из них оптимальные.

Многие компании предпочитают разрабатывать собственных цифровых двойников по индивидуальным спецификациям. В то же время существует множество «стартовых пакетов», которые могут быть включены в дизайн цифровых двойников, поддерживая взаимосвязанные данные, предоставляя удобный пользовательский интерфейс или выступая в качестве оптимизатора различных производственных затрат.

Заключение

Проведен анализ и показаны возможности цифровых двойников в сфере повышения эффективности управления компаниями в условиях динамичной бизнес-среды. Показано, что цифровые двойники играют ключевую роль в повышении эффективности управления компаниями в различных областях,

представлены конкретные способы, с помощью которых цифровые двойники способствуют повышению эффективности управления. Приводятся характерные особенности практического использования цифровых двойников на всех этапах жизненного цикла. В мире, где умение находить и принимать своевременные и эффективные решения может обеспечить конкурентное преимущество или облегчить процесс адаптации к переменам в экономике, цифровые двойники могут стать незаменимыми инструментами для решения проблем, связанных с повышением эффективности бизнеса, они превращаются в необходимый инструмент для предприятий практически всех отраслей. Использование цифровых двойников в качестве неотъемлемых компонентов управления компанией способствует повышению эффективности, инноваций и устойчивости во все более сложной бизнес-среде.

Список литературы

1. Smet A. D., Mygatt E., Sheikh I., Weddle B. The need for speed in the post-COVID-19 era – and how to achieve it. 2020. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/people%20and%20organizational%20performance/our%20insights/the%20need%20for%20speed%20in%20the%20post%20covid%2019%20era%20and%20how%20to%20achieve%20it/the-need-for-speed-in-the-post-covid-19-and-how-to-achieve-it.pdf?shouldIndex=false> (дата обращения: 25.01.2024).
2. Hanelt A., Bohnsack R., Marz D., Marante A. C. A Systematic Review of the Literature on Digital Transformation: Insights and Implications for Strategy and Organizational Change // Journal of Management Studies. 2021. Vol. 58 (5). P. 1159–1197.
3. 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
4. Vaia G., Arkhipova D., DeLone W. Digital Governance Mechanisms and Principles that Enable Agile Responses in Dynamic Competitive Environments // European Journal of Information Systems. 2022. Vol. 31 (6). P. 662–680. doi: 10.1080/0960085X.2022.2078743
5. Xu L. D., He W., Li S. Internet of things in industries: a survey // IEEE Trans Ind Informat. 2014. Vol. 10 (4). P. 2233–2243.
6. Jiang L., Xu L. D., Cai H. An IoT-oriented data storage framework in cloud computing platform // IEEE Trans Ind Informat. 2014. Vol. 10 (2). P. 1443–1451.
7. O'Leary D. E. Artificial intelligence and big data // IEEE Intell Syst. 2013. Vol. 28 (2). P. 96–99.
8. Национальный проект «Экономика данных». URL: <http://government.ru/rugovclassifier/909/events/> (дата обращения: 25.01.2024).
9. Gartner: использование цифровых двойников становится массовым. URL: <https://www.computerworld.ru/cio/news/250219-Gartner-ispolzovanie-tsifrovyyh-dvoynikov-stanovitsya-massovym> (дата обращения: 25.01.2024).
10. Valk H. van der, Haße H., Möller F. [et al.]. A Taxonomy of Digital Twins // AMCIS. 2020. P. 1–10.
11. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / ed. by F.-J. Kahlen [et al.]. Springer International Publishing Switzerland, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
12. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins // Complex Systems Engineering: Theory and Practice. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. doi: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200
13. Абрамов В. И., Гордеев В. В., Столяров А. Д. Цифровые двойники с использованием агродронов в управлении растениеводством: особенности создания и

- перспективы // АПК: экономика, управление. 2024. № 4. С. 37–49. doi: 10.33305/244-37 EDN: GCXIP1
14. Абрамов В. И., Гордеев В. В., Столяров А. Д. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития // Вопросы инновационной экономики. 2024. Т. 14, № 3. С. 691–716. doi: 10.18334/vines.14.3.121484 EDN: UKAJFT
15. Абрамов В. И., Андреев В. Д. Сравнительный анализ цифровых двойников регионов // Информационное общество. 2023. № 4. С. 106–117.
16. Camarella S., Conway M. P., Goering K., Huntington M. Digital twins: The next frontier of factory optimization. 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization?stcr=4642D992DD1340C9A9F863247BA7D822&cid=other-eml-alt-mip-mck&hlkid=66f014e83ad04d2c8c36942dc48aac99&hctky=15028795&hdpid=45519848-eaa7-456d-a9e6-8f9644db1500> (дата обращения: 25.01.2024).
17. Negri E., Berardi S., Fumagalli L., Macchi M. MES-integrated digital twin frameworks // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. P. 58–71. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007
18. Moyné J., Qamsane Y., Balta E. [et al.]. A requirements driven digital twin framework. Specification and Opportunities // IEEE. 2017. Vol. 8. P. 107781–107801. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000437
19. Weyer S., Meyer T., Ohmer M. [et al.]. Future modeling and simulation of CPS-based factories: an example from the automotive Industry // IFAC. 2016. Vol. 49. P. 97–102. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.12.168
20. Madni A., Madni C., Lucero S. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. Vol. 7, № 1. P. 7. doi: 10.3390/systems7010007
21. Tabar R. S., Warmefjord R., Soderberg R., Lindkvist L. Efficient spot welding sequence optimization in a geometry assurance digital twin // J. Mech. Des. Trans. ASME. 2020. Vol. 142, № 10. doi: 10.1115/1.4046436
22. Greif T., Stein N., Flath C. M. Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics // Comput. Ind. 2020. Vol. 121. P. 103264. doi: 10.1016/j.compind.2020.103264
23. Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A. Y. C. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment // CIRP Annals – Manufacturing Technology. CIRP-1788. 2018. P. 1–5. doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.055
24. Gao R., Wang L. H., Teti R. [et al.]. Cloudenabled Prognosis for Manufacturing // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2015. Vol. 64 (2). P. 749–772.
25. Liu M., Shuiliang Fang S., Dong H., Xu C. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58. P. 346–361. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017
26. Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И. Методика поиска многокритериальных решений на основе цифровых двойников // Экономика и управление. 2023. Т. 29, № 7. С. 851–858. doi: 10.35854/1998-1627-2023-7-851-858 EDN: BWERQI
27. Абрамов В. И., Головин О. Л., Столяров А. Д. Методика поиска Парето-оптимальных решений по развитию умных городов на базе их цифровых двойников // Современная экономика: проблемы и решения. 2021. № 9. С. 8–15. doi: 10.17308/mepps.2021.9/2666 EDN: HFOOSH

References

1. Smet A.D., Mygatt E., Sheikh I., Weddle B. *The need for speed in the post-COVID-19 era – and how to achieve it*. 2020. Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/people%20and%20organizational%20performance/our%20insights/the%20need%20for%20speed%20in%20the%20post%20covid%2019%20era%20and%20how%20to%20achieve%20it/the-need-for-speed-in-the-post-covid-19-and-how-to-achieve-it.pdf?shouldIndex=false> (accessed 25.01.2024).

2. Hanelt A., Bohnsack R., Marz D., Marante A.C. A Systematic Review of the Literature on Digital Transformation: Insights and Implications for Strategy and Organizational Change. *Journal of Management Studies*. 2021;58(5):1159–1197.
3. Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I. Architecture of the passenger clusterization 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
4. Vaia G., Arkhipova D., DeLone W. Digital Governance Mechanisms and Principles that Enable Agile Responses in Dynamic Competitive Environments. *European Journal of Information Systems*. 2022;31(6):662–680. (In Russ.). doi: 10.1080/0960085X.2022.2078743
5. Xu L.D., He W., Li S. Internet of things in industries: a survey. *IEEE Trans Ind Informat.* 2014;10(4):2233–2243.
6. Jiang L., Xu L.D., Cai H. An IoT-oriented data storage framework in cloud computing platform. *IEEE Trans Ind Informat.* 2014;10(2):1443–1451.
7. O'Leary D.E. Artificial intelligence and big data. *IEEE Intell Syst*. 2013;28(2):96–99.
8. *Natsional'nyy proekt «Ekonomika dannykh» = National Project "Data Economics"*. (In Russ.). Available at: <http://government.ru/rugovclassifier/909/events/> (accessed 25.01.2024).
9. *Gartner: ispol'zovanie tsifrovyykh dvoynikov stanovitsya massovym = Gartner: The use of digital doubles is becoming widespread*. (In Russ.). Available at: <https://www.computerworld.ru/cio/news/250219-Gartner-ispolzovanie-tsifrovyyh-dvoynikov-stanovitsya-massovym> (accessed 25.01.2024).
10. Valk H. van der, Haße H., Möller F. et al. A Taxonomy of Digital Twins. *AMCIS*. 2020:1–10.
11. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Ed. by F.-J. Kahlen et al. Springer International Publishing Switzerland, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
12. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. doi: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200
13. Abramov V.I., Gordeev V.V., Stolyarov A.D. Digital twins using agrodrons in crop management: creation features and prospects. *APK: ekonomika, upravlenie = Agroindustrial Complex: economics, management*. 2024;(4):37–49. (In Russ.). doi: 10.33305/244-37 EDN: GCXIP1
14. Abramov V.I., Gordeev V.V., Stolyarov A.D. Digital twins: characteristics, typology, development practices. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki = Issues of innovative economics*. 2024;14(3):691–716. (In Russ.). doi: 10.18334/vinec.14.3.121484 EDN: UKAJFT
15. Abramov V.I., Andreev V.D. Comparative analysis of digital counterparts of regions. *Informatsionnoe obshchestvo = Information Society*. 2023;(4):106–117. (In Russ.)
16. Camarella S., Conway M.P., Goering K., Huntington M. *Digital twins: The next frontier of factory optimization*. 2024. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization?stcr=4642D992DD1340C9A9F863247BA7D822&cid=other-eml-alt-mip-mck&hlkid=66f014e83ad04d2c8c36942dc48aac99&hctky=15028795&hdpid=45519848-eaa7-456d-a9e6-8f9644db1500> (accessed 25.01.2024).
17. Negri E., Berardi S., Fumagalli L., Macchi M. MES-integrated digital twin frameworks. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020;56:58–71. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007
18. Moyne J., Qamsane Y., Balta E. et al. A requirements driven digital twin framework. Specification and Opportunities. *IEEE*. 2017;8:107781–107801. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000437
19. Weyer S., Meyer T., Ohmer M. et al. Future modeling and simulation of CPS-based factories: an example from the automotive Industry. *IFAC*. 2016;49:97–102. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.12.168

20. Madni A., Madni C., Lucero S. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*. 2019;7(1):7. doi: 10.3390/systems7010007
21. Tabar R.S., Warmefjord R., Soderberg R., Lindkvist L. Efficient spot welding sequence optimization in a geometry assurance digital twin. *J. Mech. Des. Trans. ASME*. 2020;142(10). doi: 10.1115/1.4046436
22. Greif T., Stein N., Flath C.M. Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics. *Comput. Ind.* 2020;121:103264. doi: 10.1016/j.compind.2020.103264
23. Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A.Y.C. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. *CIRP-1788*. 2018:1–5. doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.055
24. Gao R., Wang L.H., Teti R. et al. Cloudenabled Prognosis for Manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2015;64(2):749–772.
25. Liu M., Shuiliang Fang S., Dong H., Xu C. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021;58:346–361. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017
26. Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I. Methodology for searching for multi-criteria solutions based on digital doubles. *Ekonomika i upravlenie = Economics and management*. 2023;29(7):851–858. (In Russ.). doi: 10.35854/1998-1627-2023-7-851-858 EDN: BWERQI
27. Abramov V.I., Golovin O.L., Stolyarov A.D. Methods of searching for Pareto-optimal solutions for the development of smart cities based on their digital counterparts. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya = Modern economics: problems and solutions*. 2021;(9):8–15. (In Russ.). doi: 10.17308/meps.2021.9/2666 EDN: HFOOSH

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Дмитриевич Столяров
соискатель,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»
(Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31)
E-mail: mr.alexst@gmail.com

Aleksandr D. Stolyarov
Applicant,
National Research Nuclear University
MEPhI
(31 Kashirskoe highway, Moscow, Russia)

Владимир Владимирович Гордеев
аспирант,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»
(Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31)
E-mail: v.gordeev@aerolabs.aero

Vladimir V. Gordeev
Postgraduate student,
National Research Nuclear University
MEPhI
(31 Kashirskoe highway, 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 30.01.2024

Поступила после рецензирования/Revised 13.11.2024

Принята к публикации/Accepted 19.11.2024

К ВОПРОСУ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ РАЗРАБОТКИ ПАРТНЕРСКОГО СЕРВИСА УЧЕТА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ И ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В. А. Ганявин¹, Д. Х. Михайлиди², Д. П. Еремин³

^{1, 2, 3} Центр экологической промышленной политики, Москва, Россия
¹v.ganyavin@eipc.center, ²d.mikhailidi@eipc.center, ³d.eremin@eipc.center

Аннотация. *Актуальность и цели.* Представлен концептуальный этап проектирования интеллектуального сервиса учета вторичных ресурсов и вторичного сырья для совершенствования работы государственной информационной системы промышленности. Приведены основные требования к разработке сервиса, в которых отражаются сведения о количестве вторичного сырья, доступного для применения в технологических процессах, а также географии его образования. *Материалы и методы.* Рассмотрены способы интеграции вновь создаваемого сервиса, формализованы алгоритм функционирования и программные процедуры системы поддержки принятия решений для выдачи экономически эффективных рекомендаций и предложений по взаимодействию различных категорий пользователей для согласования инновационного и инвестиционного развития отраслей и регионов. *Результаты.* Новизна предлагаемого подхода заключается в комплексном применении экспертных знаний на всех этапах моделирования в причинно-следственной парадигме с целью синтеза предпочтительных вариантов предложения развития не только для конкретного субъекта, но и о потенциальном симбиозе с другими участниками индустриальной экосистемы, включая предложения по кооперации трудовых и иных ресурсов. *Выводы.* Встраивание в информационную систему гибкой процедуры логического вывода и моделирования различных сценариев позволит сформировать для участников сервиса наиболее экономически обоснованные рекомендательные предложения по дальнейшему использованию и переработке вторичного сырья.

Ключевые слова: инструменты стратегического планирования, информационная система, система поддержки принятия решений, онтология проектирования, продуктивная модель, логический вывод

Для цитирования: Ганявин В. А., Михайлиди Д. Х., Еремин Д. П. К вопросу концептуальной разработки партнерского сервиса учета вторичных ресурсов и вторичного сырья для государственной информационной системы промышленности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 17–27. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-2

ON THE ISSUE OF CONCEPTUAL DEVELOPMENT OF A PARTNERSHIP SERVICE FOR ACCOUNTING RECYCLED RESOURCES AND RAW MATERIALS FOR THE STATE INDUSTRIAL INFORMATION SYSTEM

V.A. Ganyavin¹, D.Kh. Mikhaylidi², D.P. Eremin³

^{1, 2, 3} Environmental Industrial Policy Center, Moscow, Russia

¹v.ganyavin@eipc.center, ²d.mikhailidi@eipc.center, ³d.eremin@eipc.center

Abstract. *Background.* The conceptual stage of designing an intelligent service for accounting of recycled materials is presented to improve the operation of the state industrial information system. The basic requirements for the development of the service are given, which reflect information about the recycled amounts available for use in technological processes, as well as the geography of its formation. *Materials and methods.* Methods for integrating of new service are considered, the functioning algorithm and software procedures of the decision support system are formalized for issuing cost-effective recommendations and proposals for interaction between various categories of users for coordinating innovative and investment development of industries and regions. *Results.* The novelty of the proposed approach lies in the integrated application of expert knowledge at all stages of modeling in a cause-and-effect paradigm in order to synthesize preferred options for development proposals not only for a specific subject, but about potential symbiosis with other participants in the industrial ecosystem, including proposals for the cooperation of labor and other resources. *Conclusions.* An integration of flexible procedure for logical inference and modeling of various scenarios into the information system will allow service participants to formulate the most economically sound recommendations for the further use and processing of recycled materials.

Keywords: strategic planning instruments, information system, decision support system, design ontology, productive model, logical inference

For citation: Ganyavin V.A., Mikhaylidi D.Kh., Eremin D.P. On the issue of conceptual development of a partnership service for accounting recycled resources and raw materials for the state industrial information system. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):17–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-2

Введение

Рентабельные бизнес-процессы базируются на умении использовать ресурсные базы отраслей и регионов, их потенциал и результаты развития.

Рациональное обращение с отходами – одно из важнейших направлений сокращения негативного воздействия на окружающую среду – подразумевает сортировку (превращение во вторичные ресурсы – ВР), обработку и утилизацию (превращение во вторичное сырье – ВС) для увеличения сырьевой ресурсной базы. Данная трансформация позволяет вовлекать материалы в многократное использование (рециклинг): на каждом витке цикла «производство – потребление – получение ВР – получение ВС – производство» сокращается потребление ископаемых ресурсов, что полностью соответствует требованиям ресурсосбережения.

Ежегодно на территории Российской Федерации образуется более 9 млрд т отходов производства и потребления, количество накопленных отходов достигло 55 млрд т [1]. Подавляющую часть потока отходов составляют

отходы горнодобычи (вскрышные породы) и обогащения ископаемых ресурсов (более 96 %), отходы производства составляют менее 3 %, а отходы потребления (твердые коммунальные отходы – ТКО) – менее 1 %.

С точки зрения утилизации картина противоположная: наибольшее количество ценных компонентов содержится в ТКО, но этот вид отхода требует тщательной сортировки, производственные отходы, как правило, однородны, но не всегда существуют экономически эффективные способы их переработки. Отходы добычи и обогащения не обладают значимой ценностью, но могут использоваться при засыпке отработанных шахтных и карьерных разработок, земляных работах (например, в дорожном строительстве). Без учета последних ежегодный потенциал обращения с отходами составляет 350 млн т, из которых около 300 млн т образуются в промышленности.

Природоохранный смысл рециклинга заложен в проекты «Экология» (в части обращения с ТКО) и «Экономика замкнутого цикла» (в части утилизации отходов производства). Созданы отраслевые программы по ВР и ВС в промышленности, строительстве, жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве, обращению с вскрышными и вмещающими породами, использованию альтернативного топлива (из отходов).

Система учета ВР и ВС – это информационный ресурс для реального сектора экономики, без формирования которого нельзя себе представить развитие стратегического планирования на промышленных предприятиях и в отраслях промышленности. Комплексность и системность требуют разработки и постоянной актуализации спектра материалов, методов, продуктов, процессов, программ, типов, устройств, формирования рекомендаций, предположений и прогнозов, отслеживания воздействий регуляторных мероприятий.

Пользователь системы сможет оценить потенциал образования определенных ВР в регионе и/или отрасли хозяйствования, констатировать соответствие производств и технологий задачам вовлечения ВС, предсказать перспективы производства различных видов продукции, изготавливаемой с применением ВС, принять решение о выпуске такой продукции.

В настоящей работе поднимается вопрос актуальности разработки цифрового сервиса учета ВР и ВС и его интеграции в государственную информационную систему промышленности (ГИСП). Сервис должен содержать информацию о пользователях системы (поставщики отходов – утилизаторы отходов – покупатели ВР и ВС), данные о материальных потоках, зонах деятельности и т.д.

Материалы и методы

Эффективность жизненного цикла продукции обусловлена рациональностью производства, обработки и использования природных и техногенных ресурсов. Численно это выражается в повышении доли использования ВС, количества образующихся ВР; в уменьшении площади захоронений отходов; в сохранении производственной эффективности при снижении потребления первичных материалов.

География образования промышленных отходов и ВР на их основе (Уральский и Сибирский регионы) не совпадает с географией потребления ВС (Европейская часть России). Предел экономически оправданного перемещения большинства видов ВР, согласно оценкам аудиторско-консалтинговых компаний, составляет 500–800 км. Доля ВС в промышленном сырье оценивается

в 2024 г. в 15 %, планируется довести ее до 32 % к 2030 г. [2]. В настоящее время востребовано около 100 млн т ВР (рис. 1) в следующих индустриальных отраслях: производство строительных материалов, металлургическая, химическая, легкая и электронная промышленность. ВС органического происхождения используется в качестве RDF-топлива. Необходимы действенные механизмы вовлечения ВС в различные производственные цепочки – либо как заменителей части первичных ресурсов без потери потребительских свойств продукта, либо как основной компонент для создания новых товаров и услуг [3].

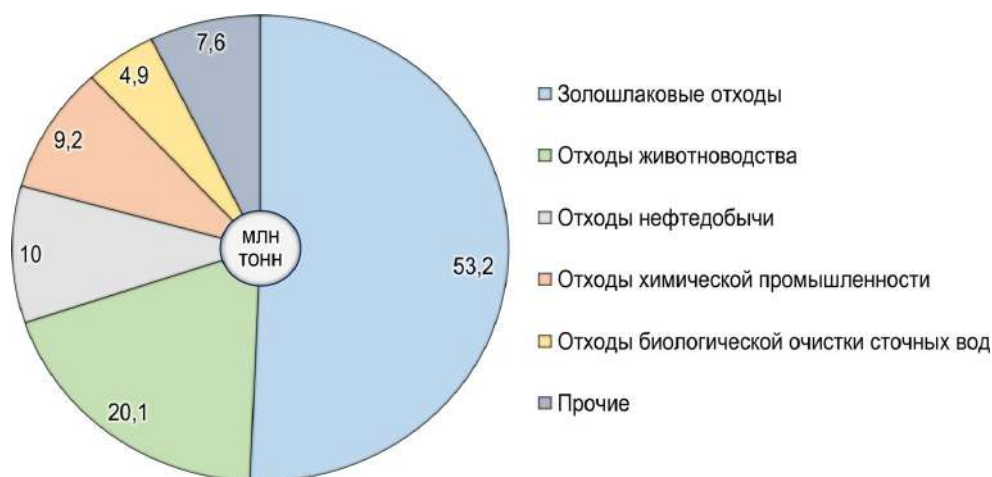


Рис. 1. Ежегодное образование востребованных видов вторичных ресурсов

В Указе Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» говорится о цифровой трансформации для достижения определенных критериев «зрелости» государственного управления, экономики и социальной сферы. Это предполагает поддержку принятия решений на основе структурированного учета данных и транзакций в рамках единых цифровых платформ.

В связи с этим, учитывая прогнозную динамику использования ВС, приоритеты развития экономики замкнутого цикла и разобщенность логистических потоков, закономерно поднимается вопрос о необходимости концентрации всей релевантной информации.

Создание государственного сервиса учета ВР и ВС коррелирует с требованиями эффективности управления экономикой. Соблюдается информационная безопасность, снижаются транзакционные издержки, создаются согласительные отраслевые площадки для кооперации и распределения усилий – все это обеспечивает институционализацию процессов.

Сервис позволит оценить потенциал образования определенных видов ВР в различных регионах и отраслях промышленности, сопоставляя производственные и технологические возможности использования ВС и сбытовые перспективы продукции, содержащей в своем составе ВС. Подобный функционал важен для снабжения предприятий по всей цепочке производственных переделов, а также для разработки и внедрения новых видов продукции, что способствует устойчивому экономическому развитию.

Сервис может быть интегрирован в базу ГИСП, которая появилась в условиях роста интереса государства к цифровизации в период реализации концепции «Государство как платформа», подразумевающей полный переход на цифровое предоставление услуг и взаимодействие между пользователями, развитие новых информационных систем. Одной из функций ГИСП является автоматизация процессов сбора и обработки информации в целях реализации промышленной политики и функционирования органов исполнительной власти по стимулированию и поддержке субъектов промышленного производства. Результатом деятельности ГИСП служит эффективный обмен данными, в том числе сведениями о состоянии промышленности и прогнозе ее развития [4].

В настоящее время ГИСП агрегирует, хранит и обрабатывает существенное количество информации о промышленных объектах, благодаря чему обладает инфраструктурой, необходимой для выстраивания описываемого сервиса. ГИСП представляет собой одну из наиболее динамично развивающихся информационных систем. В ней накоплен значительный опыт эксплуатации системы и организации разработки сервисов, обеспечивается охват 89 субъектов Российской Федерации и 35 отраслей промышленности. За счет предоставления как собственных, так и партнерских сервисов, соответствующих прикладным задачам (жизненным ситуациям), система представляет ценность для организации новых и управления существующими объектами малого и среднего бизнеса.

Кроме того, ГИСП зарекомендовала себя как наиболее дружелюбная и гибкая платформа для пользователей: для расширения функциональных возможностей в ГИСП предусмотрены алгоритмы встраивания в существующие сценарии дополнительных партнерских сервисов. В целевом состоянии пользователи могут использовать собственно ГИСП, партнерские сервисы, размещаемые в ГИСП, внешние сервисы. Таким образом, выбор и использование ГИСП в качестве платформы для интеграции сервиса по обращению с ВР и ВС является не только логически объяснимым, но и стратегически важным, наиболее целесообразным вариантом из имеющихся альтернатив.

Результаты и обсуждение

Приведем требования по интеграции сервиса с основными функциями ГИСП для типа взаимодействия «полная интеграция». На уровне источника данных настроена конфигурация на чтение и передачу идентификатора пользователя (ID) для перехода в партнерский сервис, а также архивирование о действиях пользователя. Правовая основа работы – индивидуальное соглашение о взаимодействии с поставщиком сервиса.

Для реализации потребуется индивидуальная процедура взаимодействия и вовлеченность оператора ГИСП в процессы формирования требований и управления проектом. Для обеспечения высокого уровня востребованности каждый создаваемый сервис ГИСП должен соответствовать следующим требованиям [4]:

- сервис должен удовлетворять потребности пользователя, решать его практическую проблему «под ключ»;
- компоненты сервиса должны иметь возможность вертикального и горизонтального масштабирования на другие типы аудиторий;

- пользователь должен быть проинформирован о наличии сервиса и его функционале;
- должны быть обеспечены достоверность, актуальность и полнота данных, представленных в сервисе;
- дизайн и удобство интерфейсов (UX/UI) должны соответствовать лучшим практикам;
- должна быть доступна исключительная часть функционала для некоторых типов пользователей;
- сервис предназначен для функционального заказчика.

Переход к программной разработке сервисов ГИСП на базе существующего архитектурного стиля требует сопоставления с условиями и требованиями, определяемыми на основании целевого видения технологического обеспечения всего жизненного цикла приложений. Ниже приведена архитектура микросервисной модели приложения ГИСП.

Технология и платформа разработки, развертывания, сопровождения программного обеспечения придерживается методологии непрерывной интеграции и разработки прикладных приложений (DevOps или ее защищенной модификации DevSecOps) [5], гибкой методики разработки (Agile software development) [6].

Стек технологической платформы построен на базе Docker, K8S, Java, Python и др. Для бесшовного обмена информацией с внешними источниками данных и процессами сервисов приложений используется REST API. Компонентное наполнение функциональных блоков для микросервисной архитектуры организовано по стандартной иерархической структуре, включая сети и инфраструктуру, сервисы информационного обмена и интеграции, базовые прикладные сервисы, сервисы приложений, бизнес-приложения, бизнес-данные, сервисы взаимодействия с пользователями, сервисы разработки приложений, сервисы информационной безопасности, управление сетью и системой.

Процедуры принятия обоснованных и оптимальных решений партнерского сервиса учета ВР и ВС для ГИСП должны быть максимально формализованы, особенно на ранних стадиях создания и развития и даже в условиях значительной неопределенности экономических прогнозов развития.

Для субъектов промышленности – участников сервиса – разработанная система логического вывода должна выдавать предложения развития не только для конкретного субъекта, но и о потенциальном симбиозе (интеграции) с другими участниками индустриальной экосистемы, включая предложения по кооперации (коллаборации) трудовых и иных ресурсов.

Сервис должен учитывать базы данных предприятий (географическое расположение, виды и количество потребляемых ресурсов основного производства, виды и количество производимых полезных и побочных продуктов или полуфабрикатов и т.д.), базы данных утилизации продуктов или полуфабрикатов, базы данных ГИС населенных пунктов, базы данных правил (решений), расчетный модуль, модуль логического вывода.

Входной информацией является информация о ВР, их превращении в ВС (в качестве отдельного товара или полуфабриката) и разработанная база правил (способов) использования ВС при производстве готовой продукции. Выходная информация – рекомендации и предложения по возможному взаимодействию объектов друг с другом в части реализации принципов малоотходного производства.

Схема работы системы сервиса приведена на рис. 2.

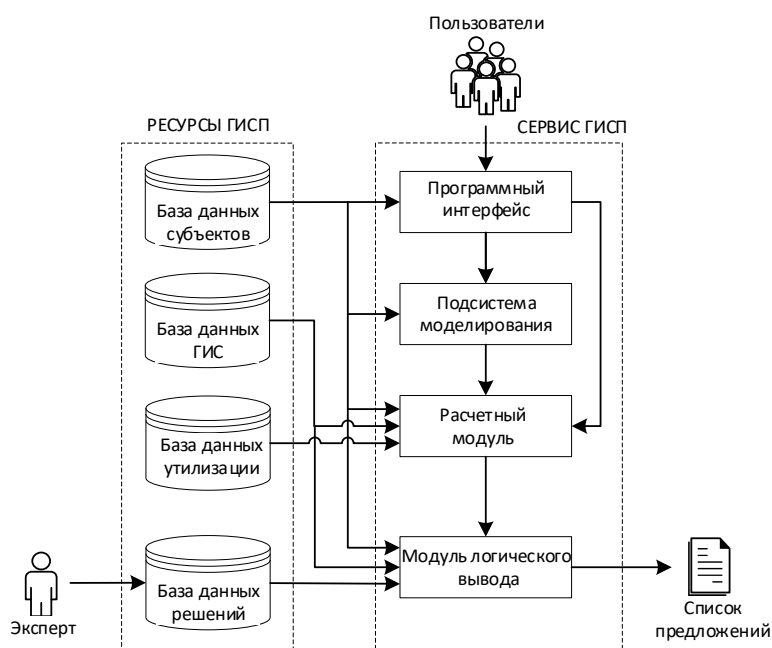


Рис. 2. Схема работы системы сервиса

Для разрабатываемой информационной системы поддержки принятия решений (СППР) с целью реализации интеллектуального механизма взаимодействия с информацией авторами предложено применение логического вывода [7], основанного на продукционных правилах [8]. В этом случае архитектура СППР будет включать в себя следующие основные программные элементы и блоки:

- базы данных – структурированные факты, понятия или инструкции, характеризующие ретроспективное и текущее состояние субъектов и объектов;
- базы знаний – данные, содержащие заранее предопределенные зависимости и их описания между различными субъектами и объектами;
- выходной блок модуля логического вывода.

Для разработки и конфигурации базы знаний изначально были определены атрибуты первого уровня модели: «*объект производства*», «*ресурсы*», «*полезная продукция*», «*основная продукция*» и т.д. В качестве атрибутов второго уровня были заведены «*мероприятие*» и «*решение*», определяющие рекомендации и предложения по возможному взаимодействию субъектов и объектов друг с другом. Для эффективного описания и представления знаний по субъектам и объектам было принято решение использовать продукционную модель в виде аналитического условия:

$$k : \langle S, F, i \rightarrow j, D, \quad (1)$$

где k – имя идентификатора продукции; S – свойство, характеризующее область применения продукции; F – условие применимости процедуры; $i \rightarrow j$ – предикат перехода из i -го в j -е состояние; D – процедуры и действия, характеризующие реализацию j .

Проиллюстрируем алгоритмическое наполнение продуктивной (семантической) модели для сервиса согласно формуле (1).

Блок «*принятие мер*». Пусть P – вероятность наилучшего найденного предложения с учетом входных критериев, например видов и количества потребляемых ресурсов, видов и количества производимых полезных и побочных продуктов или полуфабрикатов.

Решения принимаются, если вероятность предложения превышает отметку 80 % и более. Так, например, на результат системы для условия «*вывод решения*» тождественно равен «*принятие мер*» сервис начнет выполнять поиск, и в случае если на запрос «*получить решение*» вероятность будет более 80 %, то система принимает решение, иначе будет циклическое «*продолжить поиск*» и продолжится систематизация ответа.

В случае продолжения поиска решения и перехода на дополнительные алгоритмические блоки модели входные критерии заменяются (выбираются следующие), например географическое расположение поставщиков и потребителей ВР и ВС или их технологические требования (по зольности, влажности, содержанию примесей, механическим и иным свойствам и т.д.); далее процесс поиска продолжится, пока не будет найдено наилучшее предложение с учетом всех критериев и ограничений [9, 10].

При разработке вычислительного алгоритма для модуля логического вывода существуют два варианта приведения поиска решения [11, 12]: в прямом и обратном направлениях. Для экспертных систем с поиском решений в прямом направлении заключение определяется по заранее известным критериям и ограничениям. Если найденное заключение принимается согласно (1), то его «отображение» сохраняется в оперативную память модели.

Экспертные системы с поиском решений в обратном направлении применяются, когда цели определенно известны и их количество небольшое по сравнению с критериями и ограничениями. Каждый раз, когда в экспертной системе при поиске ставится новая гипотеза об условиях применимости цели к критериям и ограничениям – выдвинутые условия становятся новыми подцелями для поиска, происходят рецикл от достигнутых подцелей и детализация гипотез до тех пор, пока не будут достигнуты исходные данные задачи, подтверждающие правильность выдвинутых гипотез.

Требование к повышению эффективности процедур логического вывода для вновь разрабатываемого партнерского сервиса на базе ГИСП, включающего проверку точности отношения к цели и удаления незначимых и менее значимых правил, обязывает использовать алгоритм логического поиска в обратном направлении.

Необходимо также отметить, что с ростом количества взаимосвязей и семантических переходов в модели, т.е. при включении в базы данных новых записей по предприятиям, данных утилизаций продуктов или полуфабрикатов и другой информации, программные процедуры блока обратного логического вывода обеспечат больший выигрыш в гибкости, производительности и скорости по сравнению с традиционными архитектурами СППР [13, 14].

Заключение

Представленная концептуальная схема сервиса имеет иерархическую структуру и является многоуровневой. Сервис объединяет множество подходов, технологий и методов, позволяющих на основе экспертных правил

формировать наиболее обоснованные и экономически выгодные рекомендательные предложения по развитию отрасли и региона как для органов власти, так и для отдельных инвесторов.

Логическая поддержка принятия решений позволит заинтересованному лицу в короткий срок получить список экономически обоснованных рекомендаций, основывающихся на правилах продуктивной модели. Хранение экспертных правил в отдельном файле дает возможность постоянно актуализировать количественные и качественные критерии для оценки инвестиционных проектов и внедрения инноваций.

Разработанные процедуры могут быть встроены как типовые проектные решения для сценарного использования в алгоритмическом и программном обеспечении партнерского сервиса ГИСП, в этом случае могут быть достигнуты максимальный охват информации и ее последующая систематизация.

В результате произойдет снижение избыточности и устранение рассогласования потоков поступающей информации для инструментов внутрифирменного и стратегического планирования и для достижения целей экономики замкнутого цикла.

Выбор и использование ГИСП в качестве платформы для разработки сервиса по обращению с вторичными ресурсами и вторичным сырьем представляется наиболее оптимальным вариантом за счет имеющегося накопленного практического опыта эксплуатации системы, набора данных и гибкости системы.

Список литературы

1. Сведения об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы) за 2023 год, систематизированные по видам отходов ФККО // Росприроднадзор. URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения: 24.06.2024).
2. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года // Минэкономразвития. 2013. URL: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (дата обращения: 24.06.2024).
3. Скобелев Д. О. Наилучшие доступные технологии: опыт повышения ресурсной и экологической эффективности производства // АСМС. 2020. 250 с.
4. Об утверждении Концепции развития государственной информационной системы промышленности : приказ Минпромторга России № 2091 от 23.06.2016. URL: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minpromtorga-Rossii-ot-23.06.2016-N-2091/> (дата обращения: 24.06.2024).
5. Gartner Market Trends: DevOps – Not a Market, but Tool-Centric Philosophy That supports a Continuous Delivery Value Chain // Gartner journal. 2015. 8 Feb. URL: <https://www.gartner.com/en/documents/2987231> (дата обращения: 24.06.2024).
6. Highsmith J. Agile Software Development Ecosystems. Addison-Wesley Professional, 2002. 404 p.
7. Петровский А. Б. Теория принятия решений. Академия, 2009. 400 с.
8. Каунг М. Х. Анализ онтологических языков (о языках CYCL, Dogma, Gellish, IDEF5, KIF, RIF и OWL) // Инновации и инвестиции. 2017. № 12. С. 224–228.
9. El Amin Tebib M., Andre P., Cardin O. A Model Driven Approach for Automated Generation of Service-Oriented Holonic Manufacturing Systems // SOHOMA 2018 – International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. P. 183–196. doi: 10.1007/978-3-030-03003-2_14

10. Xu Zh., Ni Yu., He W., Yan Q. Automatic extraction of OWL ontologies from UML class diagrams: a semantics-preserving approach // *World Wide Web*. 2012. Vol. 15, № 5. P. 517–545. doi: 10.1007/s11280-011-0147-z
11. Кашникова А. П., Беляева М. Б. Метод Монте-Карло в задачах моделирования процессов и систем // *Modern Science*. 2021. № 1-2. С. 358–362.
12. Mimno D. Wallach H., Talley E. [et al.]. Optimizing semantic coherence in topic models // *Proc. of the 2011 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2011. P. 262–272. URL: <https://aclanthology.org/D11-1024.pdf> (дата обращения: 24.06.2024).
13. Федоров А. М., Датъев И. О., Шишаев М. Г. [и др.]. Информационно-аналитическая система поддержки управления региональным развитием на основе открытых больших данных социальных медиа: концепция разработки и практика реализации // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2022. Т. 13, № 2. С. 5–22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-analiticheskaya-sistema-podderzhki-upravleniya-regionalnym-razvitiem-na-osnove-otkrytyh-bolshih-dannyh-sotsialnyh> (дата обращения: 28.06.2024).
14. Кузьмин В. Р., Загоруйко Ю. А. Применение агентно-сервисного подхода при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в энергетике // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*. 2020. Т. 18, № 3. С. 5–18. doi: 10.25205/1818-7900-2020-18-3-5-18

References

1. Information on the formation, processing, disposal, neutralization, and disposal of industrial and consumer waste in the form of 2-TP (waste) for 2023, systematized by type of waste from the Federal Tax Service. *Rosprirodnadzor = Rosprirodnadzor*. (In Russ.). Available at: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (accessed 24.06.2024).
2. Forecast of the long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2030. *Minekonomrazvitiya = Ministry of Economic Development*. 2013. (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (accessed 24.06.2024).
3. Skobelev D.O. The best available technologies: experience in increasing resource and environmental efficiency of production. *ASMS = ASMS*. 2020:250. (In Russ.)
4. On approval of the Concept for the Development of the State Information System of Industry: Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia No. 2091 dated 06/23/2016. (In Russ.). Available at: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minpromtorga-Rossii-ot-23.06.2016-N-2091/> (accessed 24.06.2024).
5. Gartner Market Trends: DevOps – Not a Market, but Tool-Centric Philosophy That supports a Continuous Delivery Value Chain. *Gartner journal*. 2015. 8 Feb. Available at: <https://www.gartner.com/en/documents/2987231> (accessed 24.06.2024).
6. Highsmith J. *Agile Software Development Ecosystems*. Addison-Wesley Professional, 2002:404.
7. Petrovskiy A.B. *Teoriya prinyatiya resheniy = Theory of decision-making*. Akademiya, 2009:400. (In Russ.)
8. Kaung M.Kh. Analysis of ontological languages (on the languages CYCL, Dogma, Gellish, IDEF5, KIF, RIF and OWL). *Innovatsii i investitsii = Innovations and investments*. 2017;(12):224–228. (In Russ.)
9. El Amin Tebib M., Andre P., Cardin O. A Model Driven Approach for Automated Generation of Service-Oriented Holonic Manufacturing Systems. *SOHOMA 2018 – International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. 2018:183–196. doi: 10.1007/978-3-030-03003-2_14
10. Xu Zh., Ni Yu., He W., Yan Q. Automatic extraction of OWL ontologies from UML class diagrams: a semantics-preserving approach. *World Wide Web*. 2012;15(5):517–545. doi: 10.1007/s11280-011-0147-z

11. Kashnikova A.P., Belyaeva M.B. The Monte Carlo method in modeling processes and systems. *Modern Science*. 2021;(1-2):358–362. (In Russ.)
12. Mimno D. Wallach H., Talley E. et al. Optimizing semantic coherence in topic models. *Proc. of the 2011 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2011:262–272. Available at: <https://aclanthology.org/D11-1024.pdf> (accessed 24.06.2024).
13. Fedorov A.M., Dat'ev I.O., Shishaev M.G. et al. Information and analytical support system for regional development management based on open big data of social media: development concept and implementation practice. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences*. 2022;13(2):5–22. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-analiticheskaya-sistema-podderzhki-upravleniya-regionalnym-razvitiem-na-osnove-otkrytyh-bolshih-dannyh-sotsialnyh> (accessed 28.06.2024).
14. Kuz'min V.R., Zagorul'ko Yu.A. Application of the agent-service approach in the development of intelligent decision support systems in the energy sector. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information Technology*. 2020;18(3):5–18. (In Russ.). doi: 10.25205/1818-7900-2020-18-3-5-18

Информация об авторах / Information about the authors

Василий Александрович Ганявин

кандидат технических наук,
научный сотрудник,
Центр экологической
промышленной политики
(Россия, г. Москва, Стремянный пер., 38)
E-mail: v.ganyavin@eipc.center

Vasily A. Ganyavin

Candidate of technical sciences,
scientific researcher,
Environmental Industrial Policy Center
(38 Stremyanniy lane, Moscow, Russia)

Дмитрий Христофорович Михайлиди

кандидат экономических наук,
научный сотрудник,
Центр экологической
промышленной политики
(Россия, г. Москва, Стремянный пер., 38)
E-mail: d.mikhailidi@eipc.center

Dmitriy Kh. Mikhaylidi

Candidate of economical sciences,
scientific researcher,
Environmental Industrial Policy Center
(38 Stremyanniy lane, Moscow, Russia)

Дмитрий Павлович Еремин

начальник отдела,
Центр экологической
промышленной политики
(Россия, г. Москва, Стремянный пер., 38)
E-mail: d.eremin@eipc.center

Dmitriy P. Eremin

Department head,
Environmental Industrial Policy Center
(38 Stremyanniy lane, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 24.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 18.07.2024

Принята к публикации/Accepted 10.08.2024

ЦЕНТР КЛАСТЕРНОГО РАЗВИТИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ КЛАСТЕРНОЙ ПОЛИТИКИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Е. М. Коростышевская¹, А. В. Новиков², М. В. Рединская³

^{1,3} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Ивангородский гуманитарно-технический институт,
Ивангород, Ленинградская обл., Россия

¹e.korostushvskaya@spbu.ru, ²a.novikov@spbu.ru, ³sto98172@student.spbu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Системно рассматривается деятельность Центра кластерного развития Санкт-Петербурга (ЦКР СПб), для целей реализации действенной кластерной политики в Санкт-Петербурге разработан комплекс рекомендаций. ЦКР СПб является ключевым инструментом кластерной политики СПб; о функционировании ЦКР сформировано системное представление; выявлены ключевые проблемы, препятствующие его результативной деятельности; сформулирован комплекс рекомендаций по их устранению. *Материалы и методы.* Проведен комплексный историко-логический анализ работ российских и зарубежных ученых. Методологический аппарат представлен системным и ситуационным подходами, применены структурный и функциональный методы исследования, метод научной абстракции, методы индукции и дедукции и экономико-статистические методы для сбора информации. *Результаты.* Предложено авторское определение понятия «кластер», позволяющее повысить уровень разработки и реализации кластерной политики в Санкт-Петербурге. Впервые дана характеристика кластерной политики Санкт-Петербурга с точки зрения результативности Центра кластерного развития, что позволило выявить резервы ее совершенствования. Выработаны предложения по корректировке кластерной политики Санкт-Петербурга. *Выводы.* Выявление слабых мест кластерной политики с точки зрения функционирования ЦКР Санкт-Петербурга и их последующее устранение позволит повысить производительность труда в кластерах Санкт-Петербурга, что приведет к более эффективной реализации кластерной политики и усилению экономической позиции региона.

Ключевые слова: кластер, кластерное развитие, кластерная политика Санкт-Петербурга, сетевая организация, синергетический эффект

Для цитирования: Коростышевская Е. М., Новиков А. В., Рединская М. В. Центр кластерного развития как инструмент реализации кластерной политики Санкт-Петербурга // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 28–38. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-3

THE CLUSTER DEVELOPMENT CENTER AS A TOOL FOR IMPLEMENTING CLUSTER POLICY IN ST. PETERSBURG

E.M. Korostyshevskaya¹, A.V. Novikov², M.V. Redinskaya³

^{1,3} Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² Ivangorod Humanitarian and Technical Institute, Ivangorod, Leningrad region, Russia

¹e.korostushvskaya@spbu.ru, ²a.novikov@spbu.ru, ³sto98172@student.spbu.ru

Abstract. *Background.* The article allows a systematic review of the activities of the St. Petersburg Cluster Development Center. For the purpose of implementing an effective cluster policy in St. Petersburg, a set of recommendations has been developed. The Central Bank of St. Petersburg is a key instrument of cluster policy St. Petersburg, a systematic view has been formed about the functioning of the Central Committee; key problems hindering its effective activities have been identified, and a set of recommendations for their elimination has been formulated. *Materials and methods.* A comprehensive historical and logical analysis of the works of Russian and foreign scientists was carried out. The methodological apparatus is represented by a systematic and situational approach, using structural and functional research methods, the method of scientific abstraction, methods of induction and deduction, and economic and statistical methods for collecting information. *Results.* The author's definition of the concept of "cluster" is proposed, which makes it possible to increase the level of development and implementation of cluster policy in St. Petersburg. The cluster policy is characterized for the first time St. Petersburg from the point of view of the effectiveness of the Cluster Development Center, which made it possible to identify reserves for its improvement. Proposals have been developed to adjust the cluster policy of St. Petersburg. *Conclusions.* Identifying the weaknesses of the cluster policy from the point of view of the functioning of the Central Bank of St. Petersburg and their subsequent elimination will increase labor productivity in clusters St. Petersburg, which will lead to a more effective implementation of cluster policy and strengthen the economic position of the region.

Keywords: cluster, cluster development, cluster policy of St. Petersburg, network organization, synergetic effect

For citation: Korostyshevskaya E.M., Novikov A.V., Redinskaya M.V. The cluster development center as a tool for implementing cluster policy in St. Petersburg. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):28–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-3

Введение

Сегодня особенно актуальны проблемы роли государственного управления территориальным развитием и инструментария государственного регулирования экономики.

Реализация конкурентных преимуществ Санкт-Петербурга во многом зависит от направленности кластерной политики, эффективности Центра кластерного развития (ЦКР), что, безусловно, представляет совершенно особый интерес.

О необходимости возврата на ускоренную траекторию инновационного развития свидетельствуют также и существующие резервы повышения конкурентоспособности РФ. Резервы для развития отражает рейтинг *Global Innovation Index*, согласно которому с 2015 по 2022 г. Россия поднялась всего на два пункта, что говорит о ее медленном развитии в разрезе направлений, которые учитывает при расчете данный индекс. Лидером рейтинга является Швейцария, которая опережает РФ по показателям: сложности бизнеса (числа занятых в науке, количества патентов), инфраструктуры, сложности рынка (включая кредиты, инвестиции, торговлю, диверсификацию и рыночные масштабы). Россия отстает по показателям: институтов, творческого потенциала, человеческого капитала, отдачи от знаний и технологий. В соответствии с *Global Innovation Index* (2022) Россия занимает 47 место из 132 государств по уровню инновационного развития¹.

¹ URL: <https://www.globalinnovationindex.org/gii-2022-report>

Исследования кластеров

Фундаментальную основу исследования заложили авторы немецкой научной традиции, исследователи пространства: Й. фон Тюнен, В. Лаунгардт, А. Вебер, А. Леш.

1. Становление пространственной экономической теории связано с работой Й. фон Тюнена «Изолированное государство» (1826), посвященной проблеме размещения сельскохозяйственного производства. Он разработал концепцию колец специализации и установил зависимость специализации территории от расстояния до рынка сбыта.

2. В. Лаунгардт в исследовании «Математическое обоснование учения о народном хозяйстве» (1885) разработал концепцию промышленного штандорта, определяющую оптимальное местоположение промышленного предприятия относительно источника сырья и рынка сбыта.

3. На основании исследований Й. фон Тюнена, В. Лаунгардта А. Вебер в работе «Чистая теория размещения промышленности» (1926) выдвинул многофакторную модель размещения предприятия, включающую транспортные издержки, издержки на оплату труда и агломерационный эффект.

5. Основы теории конкурентных преимуществ и экономических кластеров были заложены задолго до М. Портера. Значительный вклад внес британский экономист А. Маршалл. В «Принципах экономической науки» (1890) он выделил и проанализировал феномен локализованной промышленности, фокусируясь на поиске принципов формирования региональных специализаций.

6. Й. Шумпетер в работе «*Capitalism, Socialism and Democracy*» рассматривал кластер как инновационный процесс, способный стимулировать технологические преобразования и развитие экономики в целом [1].

7. А. Леш в монографии «Географическое размещение хозяйства» разработал теорию пространственного экономического равновесия, обосновал понятие рыночной зоны как основы классификации рыночных районов [2].

8. М. Портер в работе «*The Competitive Advantage of Nations*» (1990) предложил модель конкурентоспособности наций, включающую в себя кластеры как ключевой элемент.

На настоящий момент исследование собственно кластеров и кластерной политики – бурно развивающаяся отрасль науки, широко востребованная на практике.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод о том, что наиболее полно ключевые признаки зарождающегося кластера обозначил М. Портер [3].

Вместе с тем, учитывая наши исследования [4, 5], а также современные реалии, так или иначе связанные с необходимостью разработки и реализации действенной кластерной политики, наиболее характерными признаками кластера являются следующие: географическая локализация производства; родственность отраслей, представленных в кластере; сетевой принцип организации; кооперация и конкуренция в борьбе за потребителя; конкурентоспособность, значительная роль в повышении инновационной активности региона на основе всех элементов тройной спирали (государство, бизнес, университеты); встроенность в глобальные цепочки создания ценности на основе взаимозависимости и лидерства с целью обеспечения технологического суверенитета страны. Понимание сущности кластера позволяет заложить основу для повышения результативности проводимой кластерной политики.

Вместе с тем в официальных документах отсутствует определение категории «кластер», что противоречит научным исследованиям и не способствует разработке и реализации эффективной кластерной политики в стране и ее регионах. Так, в Федеральном законе от 22.07.2005 № 116-ФЗ «Об особых экономических зонах в Российской Федерации» кластер трактуется как «совокупность особых экономических зон одного типа или нескольких типов, которая определяется Правительством Российской Федерации и управление которой осуществляется одной управляющей компанией».

Региональный кластер

В зарубежной литературе можно встретить трактовки понятия «региональный кластер» прежде всего в трудах М. Портера и М. Энрайта.

Согласно теории М. Портера, кластер – это группа географически соседствующих взаимосвязанных компаний (поставщики, производители) и связанных с ними организаций (образовательные заведения, органы государственного управления, инфраструктурные компании), действующих в определенной сфере и взаимодополняющих друг друга [6].

Особенность определения регионального кластера заключается в его географии. Исследователи Е. М. Bergman, Е. J. Feser определяют региональный кластер как совокупность промышленных кластеров, сконцентрированных географически внутри региона со столицей, общей инфраструктурой и общим рынком труда [7].

В соответствии с исследованием М. J. Enright региональный кластер представляет собой географическую агломерацию фирм в нескольких отраслях экономики или в одной отрасли экономики [8].

М. Энрайт характеризует «региональный кластер» как совокупность географически близких фирм промышленного кластера [8].

На эффективность проведения региональной кластерной политики и на результативность формирования кластеров в регионе оказывают влияние факторы исторического развития, географического положения региона, культуры ведения бизнеса, уровня диверсификации производства.

В соответствии с исследованием Е. А. Черникова предпосылками формирования территориальных кластеров являются:

- 1) рост уровня промышленного производства в совокупности с ростом доли инновационной продукции в промышленном производстве валового регионального продукта;
- 2) существование в регионе научной базы в виде взаимосвязей научно-исследовательских институтов, высших учебных заведений;
- 3) развитая логистика и дорожно-транспортная инфраструктура регионального, федерального и международного значения;
- 4) развитие партнерских отношений между сторонами, заинтересованными в развитии территории [9].

Кластерная политика

Эффективная кластерная политика нацелена на помощь в достижении роста конкурентоспособности бизнеса посредством увеличения эффективности способов взаимодействия всех членов кластера. Взаимодействие связано

с их недалеким расположением, значительным доступом к продуктовым и технологическим инновациям, узкоспециализированной продукции, высококвалифицированным кадрам, а также с открытием вариантов наибольшей реализации совместных проектов. На текущий момент в РФ в числе передовых регионов в контексте создания и выполнения кластерной политики следует отметить Санкт-Петербург, Пермский край, Республику Татарстан, Самарскую, Томскую, Калужскую и Липецкую области [10].

На рис. 1 представлена организационно-экономическая структура кластера региона.

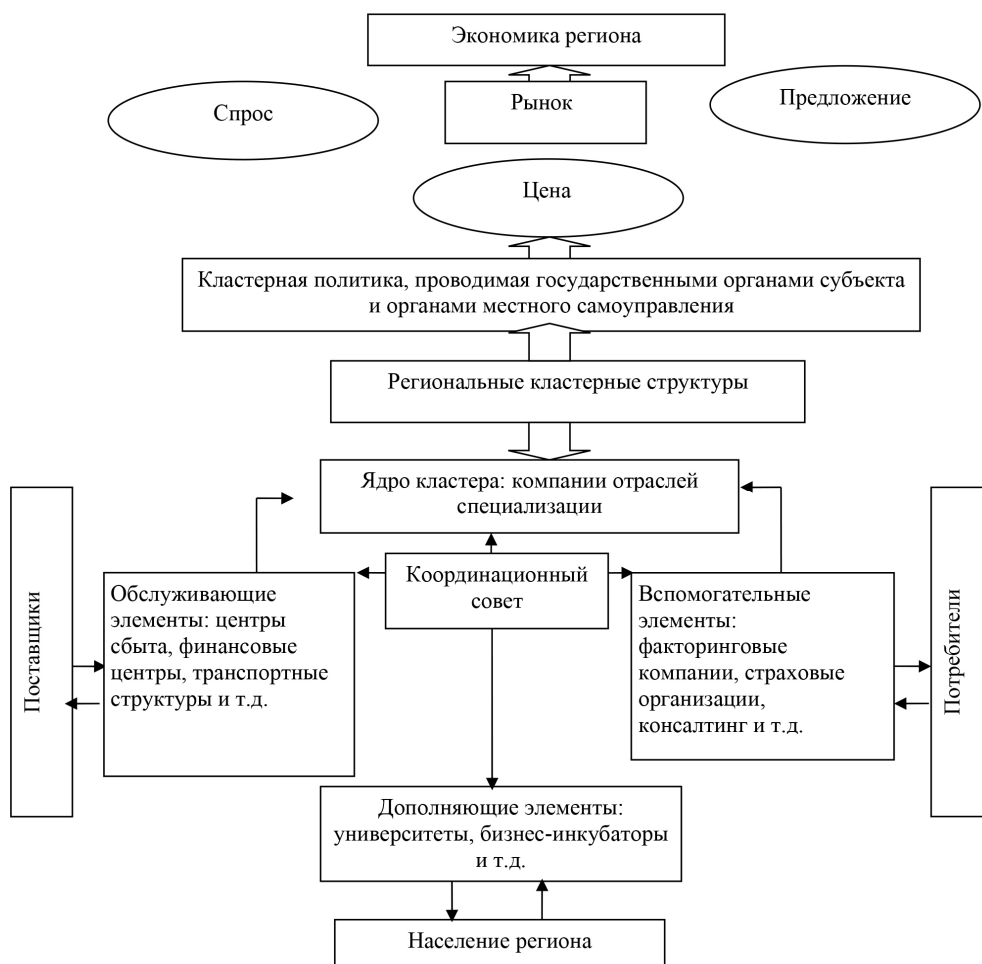


Рис. 1. Организационно-экономическая структура кластера региона
(составлено автором в соответствии с исследованием [11])

Так, исходя из рис. 1, самые крупные субъекты бизнеса способны стимулировать развитие малых и средних хозяйствующих субъектов, а такой стимул будет способствовать упрочнению их позиций. Стоит отметить, что ядром кластера являются именно те компании, которые реализуют конкурентные преимущества региона.

Свою методологию анализа процессов кластеризации в регионе разработал и применил на Республике Марий Эл В. А. Головин. Методология автора основывается на анализе структурных сдвигов (*shift-share method*). Данный метод позволяет выделить в развитии или упадке отрасли три составляющие: национальную, отраслевую и региональную. В традиционном варианте в качестве базы берется число занятых по видам экономической деятельности. Затем на основании значения каждого фактора делается вывод о наличии кластерного потенциала в конкретной отрасли. В. А. Головин указывает на то, что «высоким кластерным потенциалом и высокой конкурентоспособностью характеризуются отрасли с высоким значением фактора *RS*» [12]. Однако автор пошел дальше: он обратил внимание на то, что процесс кластеризации связан не столько с количественным ростом объема используемых ресурсов (что характеризует показатель количества занятых), сколько с более эффективным их использованием. Потому при использовании метода структурных сдвигов для анализа кластерного потенциала необходимо в качестве основы использовать не количество занятых, а производительность труда в отрасли.

Кластерная политика осуществляется как комплекс государственных и общественных мер, инструментов и механизмов поддержки кластеров. Центр кластерного развития в Санкт-Петербурге является инструментом реализации кластерной политики, созданным Минэкономразвития в 2010 г. Среди основных целей ЦКР можно выделить координацию участников кластеров, обеспечение условий для создания и развития кластеров, повышение конкурентоспособности субъектов малого и среднего предпринимательства.

Центр кластерного развития

Первоначальная задача Центра кластерного развития заключается в анализе и идентификации потенциальных кластеров и кластерных инициатив в регионе. Далее центры кластерного развития разрабатывают детальные планы и стратегии развития кластеров, оказывают консультационную поддержку компаниям и предоставляют информацию о возможностях и ресурсах для развития кластеров. Одним из ключевых инструментов, используемых центрами кластерного развития, является создание сетевых связей между компаниями в рамках кластера и за его пределами. Центры кластерного развития играют роль посредников, объединяя компании, исследовательские институты, университеты и государственные органы для обеспечения эффективного обмена информацией, опытом и технологиями. Такие связи способствуют улучшению инновационного потенциала кластеров и стимулируют развитие новых продуктов и услуг.

Центры кластерного развития организуют различные образовательные программы, тренинги и мастер-классы, направленные на повышение квалификации специалистов и развитие их профессиональных навыков. Это способствует повышению конкурентоспособности предприятий и укреплению инновационного потенциала кластера в целом.

Создание центров кластерного развития является одним из ключевых направлений содействия развитию кластеров и кластерной политики. Эти организации играют важную роль в анализе и разработке стратегий развития кластеров, организации сетевых связей и обеспечения обмена знаниями и технологиями, а также в поддержке обучения и развития кадров. Центры

кластерного развития являются неотъемлемой частью инструментария успешной кластерной политики и способствуют стимулированию экономического роста и конкурентоспособности регионов.

Впервые охарактеризована кластерная политика Санкт-Петербурга с точки зрения результативности Центра кластерного развития, что позволило выявить резервы ее совершенствования. О результативности кластерной политики Санкт-Петербурга в разрезе вклада кластеров Центра кластерного развития можно судить по табл. 1, в которой представлены результаты кластеров за 2018 г.

Таблица 1

Рейтинг эффективности деятельности кластеров участников ЦКР 2018 г.
(составлено авторами на основе сайта Центра кластерного развития [13])

Показатель	Выручка, млрд руб.	Средне- списочная численность рабочих мест, ед.	Количество участников кластера	Производительность труда, млрд руб. в год
Кластер медицинской и фармацевтической промышленности	80 224,07	30 066	192	2,668
Кластер информационных технологий и радиоэлектроники	62 855,21	13 499	214	4,656
Кластер развития инноваций в энергетике и промышленности	53 355,46	1538	43	34,691
Кластер станко-инструментальной промышленности	3856,601	930	26	4,147
Кластер чистых технологий для городской среды	19 691,81	44 500	60	0,443
Санкт-Петербургский кластер транспортного машиностроения	19 691,81	754	15	26,116
Кластер «Автопром Северо-Запад»	12 434,69	1487	26	8,362
Композитный кластер Санкт-Петербурга	—	4115	40	—

Согласно исследованию М. Портера [3], при поиске точек роста региона следует рассматривать наиболее успешные отрасли, чем объясняется необходимость анализа результативности кластеров. В табл. 1 составлен рейтинг кластеров Санкт-Петербурга по уровню выручки. Наибольшая доля выручки из представленных кластеров принадлежит «Кластеру медицинской и фармацевтической промышленности» (32 % от общей выручки всех кластеров), на втором месте «Кластер информационных технологий и радиоэлектроники» (25 %), третье место занимает «Кластер развития инноваций в энергетике

и промышленности» (21 %). Отсутствует достаточная информационная база о вкладе кластеров в валовой региональный продукт, уровень занятости и инновационную активность Санкт-Петербурга. Наиболее производительным является «Кластер развития инноваций в энергетике и промышленности» (34, 691 млрд руб. в год). На втором месте по производительности труда «Кластер транспортного машиностроения» (26, 116 млрд руб. в год).

Заключение

Слабые места кластерной политики Санкт-Петербурга с точки зрения деятельности ЦКР по результатам расчетов заключаются в следующем:

1. В «Кластере чистых технологий для городской среды» низкий уровень производительности труда (443 тыс. руб. в год производит сотрудник кластера). Наибольшее количество работников (44 500 человек) позволяет сделать вывод о нерациональном использовании человеческих ресурсов в этом кластере.

2. В «Кластере медицинской и фармацевтической промышленности» производительность труда низка и составляет 2668 тыс. руб.

3. Низкая производительность труда у «Кластера станкоинструментальной промышленности» – 4147 тыс. руб. в год, выручка кластера составляет 1,5 % от выручки кластеров Санкт-Петербурга под руководством ЦКР.

Чтобы скорректировать кластерную политику Санкт-Петербурга и устранить выявленные слабые места целесообразно реализовать мероприятия:

1. Внедрить программу повышения производительности труда в кластерах с нерациональным использованием трудовых ресурсов, таких как «Кластер чистых технологий для городской среды». В программу необходимо включить обучение современным технологиям работы, повышение квалификации, внедрение эффективных систем управления, повышение уровня мотивации сотрудников.

2. Разработать программу для повышения результативности деятельности в «Кластере медицинской и фармацевтической промышленности». В части производительности труда необходимо модернизировать процессы, внедрять современные технологии и поддерживать инновационные проекты в медицине и фармацевтике.

3. Повысить производительность труда в «Кластере станкоинструментальной промышленности» путем реорганизации производственных процессов и внедрения методов высокотехнологичного производства.

4. Усилить плотность взаимодействия по вопросам результативности между государством и ЦКР Санкт-Петербурга. Обеспечить эффективное объединение всех заинтересованных сторон для внедрения разработанных мер.

5. Привлечь инвестиции путем создания инвестиционных программ. Обеспечивать кластеры с низкой результативностью не только льготами и финансовой поддержкой государства, но и консультационными услугами по выходу кластеров из кризисных состояний, созданию конкурентоспособности кластеров.

6. Усилить роль науки в развитии кластеров. Поддерживать инновационные проекты научно-исследовательских центров и образовательных учреждений. Создавать научно-технический прогресс, вовлекая научные учреждения в разработку и реализацию инновационных проектов.

Реализация предложенных мер позволит повысить результативность ЦКР Санкт-Петербурга и результативность кластерной политики, что укрепит экономические позиции региона и России в инновационных рейтингах в целом.

Основные результаты проведенного исследования определяются следующими положениями:

- предложено авторское определение понятия «кластер», позволяющее повысить уровень разработки теоретико-методологических основ кластерной политики и ее реализации;

- показано, что одним из ключевых направлений содействия развитию кластеров и кластерной политики является создание центров кластерного развития;

- впервые проанализирована проблематика кластерной политики Санкт-Петербурга с точки зрения результативности ЦКР, что позволило выявить резервы ее совершенствования. Требуется постоянный мониторинг показателей деятельности ЦКР с целью выявления их узких мест, а также проблем и потребностей как инструмента кластерной политики;

- разработаны предложения по корректировке кластерной политики Санкт-Петербурга;

- выявлено отсутствие исследований, так или иначе посвященных центрам кластерного развития.

Определено направление для дальнейших исследований: разработка инструментов для оценки условий развития кластеров региона, адаптация методики выявления потенциальных кластеров к условиям современной экономики России.

Список литературы

1. Schumpeter J. A. Capitalism, socialism and democracy. 1943. 437 p.
2. Lesh A. Geographic location of the economy. M. : Publishing house of foreign literature, 1959. 455 p.
3. Портер М. Э. Конкуренция. М. : Вильямс, 2006. 608 с.
4. Коростышевская Е. М., Шумова А. И. Кластерная политика России в условиях развития региональных инновационных систем // Инновации. 2019. С. 71–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klaster-naya-politika-rossii-v-usloviyah-razvitiya-regionalnyh-innovatsionnyh-sistem> (дата обращения: 03.07.2024).
5. Коростышевская Е. М., Долгушев Н. В., Чудаков А. Ю. Кластеры компетенций, как инструмент коммерциализации технологических разработок в условиях глобализации – регионализации мировой экономики // Экономика и бизнес. 2019. С. 26–33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klastery-kompetentsiy-kak-instrument-kommertsializatsii-tehnologicheskikh-razrabotok-v-usloviyah-globalizatsii-regionalizatsii> (дата обращения: 30.08.2024).
6. Бузыкина Т. А. Кластерная теория М. Портера и ее практическое применение в российском опыте // Журнал экономической теории. 2011. С. 118–122.
7. Bergman E. M., Feser E. J. Industrial and Regional Cluster: Concepts and Comparative Applications. 1999.
8. Enright M. J. Survey on the Characterization of Regional Clusters: Initial Results : Working Paper / Institute of Economic Policy and Business Strategy: Competitiveness Program University of Hong Kong. 2000. 21 p.
9. Черников Е. А. Формирование кластеров в целях повышения конкурентоспособности регионов Российской Федерации в современных социально-экономических условиях // Региональная экономика: теория и практика. 2009. № 40. С. 28–32.

10. Земцов С., Барина В., Панкратов А., Куценко Е. Потенциальные высокотехнологические кластеры в российских регионах: от текущей политики к новым точкам роста // Форсайт. 2016. Т. 10, № 3. 67 с.
11. Лапа Е. А. Кластерная политика России как инструмент регионального развития // Стратегические ориентиры развития экономических систем в современных условиях. 2016. С. 125–127.
12. Головин В. А. Анализ факторов и потенциала развития экономических кластеров в республике Марий Эл по видам экономической деятельности // Экономика региона. 2017. С. 1068–1079.
13. Центр кластерного развития Санкт-Петербурга. URL: <https://spbcluster.ru>

References

1. Schumpeter J.A. *Sapitalism, socialism and democracy*. 1943:437.
2. Lesh A. Geographic location of the economy. Moscow: Publishing house of foreign literature, 1959:455.
3. Porter M.E. *Konkurentsiya = Competition*. Moscow: Vil'yams, 2006:608. (In Russ.)
4. Korostyshevskaya E.M., Shumova A.I. Cluster policy of Russia in the context of the development of regional innovation systems. *Innovatsii = Innovation*. 2019:71–81. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/klaster-naya-politika-rossii-v-usloviyah-razvitiya-regionalnyh-innovatsionnyh-sistem> (accessed 03.07.2024).
5. Korostyshevskaya E.M., Dolgushev N.V., Chudakov A.Yu. Clusters of competencies as a tool for commercialization of technological developments in the context of globalization and regionalization of the world economy. *Ekonomika i biznes = Economics and business*. 2019:26–33. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/klaster-y-kompetentsiy-kak-instrument-kommertsializatsii-tehnologicheskikh-razrabotok-v-usloviyah-globalizatsii-regionalizatsii> (accessed 30.08.2024).
6. Buzykina T.A. Porter's cluster theory and its practical application in Russian experience. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii = Journal of Economic Theory*. 2011: 118–122. (In Russ.)
7. Bergman E.M., Feser E.J. *Industrial and Regional Cluster: Concepts and Comparative Applications*. 1999.
8. Enright M.J. *Survey on the Characterization of Regional Clusters: Initial Results: Working Paper* / Institute of Economic Policy and Business Strategy: Competitiveness Program University of Hong Kong. 2000:21.
9. Chernikov E.A. Formation of clusters in order to increase the competitiveness of the regions of the Russian Federation in modern socio-economic conditions. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika = Regional economics: theory and practice*. 2009;(40):28–32. (In Russ.)
10. Zemtsov S., Barinova V., Pankratov A., Kutsenko E. Potential high-tech clusters in Russian regions: from current policy to new growth points. *Forsayt = Foresight*. 2016;10(3):67. (In Russ.)
11. Lapa E.A. Cluster policy of Russia as a tool for regional development. *Strategicheskie orientiry razvitiya ekonomicheskikh sistem v sovremennykh usloviyakh = Strategic guidelines for the development of economic systems in modern conditions*. 2016:125–127. (In Russ.)
12. Golovin V.A. Analysis of factors and development potential of economic clusters in the Republic of Mari El by types of economic activity. *Ekonomika regiona = The economy of the region*. 2017:1068–1079. (In Russ.)
13. *Tsentr klaster-nogo razvitiya Sankt-Peterburga = St. Petersburg Cluster Development Center*. (In Russ.). Available at: <https://spbcluster.ru>

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Михайловна Коростышевская
доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры экономической
теории и экономической политики,
Санкт-Петербургский государственный
университет
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Университетская набережная, 7–9)
E-mail: e.korostushvskaya@spbu.ru

Elena M. Korostyshevskaya
Doctor of economical sciences, professor,
professor of the sub-department
of economic theory and economic policy,
Saint-Petersburg State University
(7–9 Universitetskaya embankment,
Saint Petersburg, Russia)

Андрей Владимирович Новиков
кандидат экономических наук, доцент
кафедры социально-экономических наук
и внешнеэкономической деятельности,
Ивангородский гуманитарно-
технический институт
(Россия, Ленинградская область,
г. Ивангород, ул. Котовского, 1)
E-mail: a.novikov@spbu.ru

Andrey V. Novikov
Candidate of economical sciences,
associate professor of the sub-department
of socio-economic sciences
and foreign economic activity,
Ivangorod Humanitarian
and Technical Institute
(1 Kotovsky street, Ivangorod,
Leningrad region, Russia)

Мария Вадимовна Рединская
магистрант,
Санкт-Петербургский государственный
университет
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Университетская набережная, 7–9)
E-mail: sto98172@student.spbu.ru

Maria V. Redinskaya
Master degree student,
Saint-Petersburg State University
(7–9 Universitetskaya embankment,
Saint Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 14.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 19.08.2024

Принята к публикации/Accepted 22.08.2024

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ФУНКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНТЕРЕСОВ

Н. С. Чернецова

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
chernetsovans@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Условием жизнеспособности любой социально-экономической системы является рост уровня жизни всех слоев общества, который зависит от степени устойчивости, положительной динамики экономических процессов. Целью исследования является установление зависимости устойчивого развития экономической системы от условий реализации национальных экономических интересов посредством определения сопряженности факторов позитивной динамики экономических процессов и факторов реализации системы экономических интересов. *Материалы и методы.* Для достижения данной цели использовались общенаучные и специальные методы: агрегирования, абстрагирования, систематизации анализируемого материала, группировки, моделирования. Методология исследования базируется на институционально-эволюционной концепции и системном подходе. *Результаты.* Представлена концепция построения модели устойчивого развития экономической системы на основе обоснования сопряженности основных характеристик и факторов устойчивого развития экономических систем и процесса реализации национальных экономических интересов. *Выводы.* Устойчивое развитие экономической системы является функцией реализации национальных экономических интересов, которая обеспечивает возможности относительного разрешения основного противоречия экономики между растущими потребностями общества и ограниченностью его ресурсов.

Ключевые слова: потребности, ресурсы, интерес, национальные интересы, устойчивое развитие

Для цитирования: Чернецова Н. С. Устойчивое развитие экономических систем как функция системы экономических интересов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 39–52. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-4

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ECONOMIC SYSTEMS AS A FUNCTION OF THE SYSTEM OF ECONOMIC INTERESTS

N.S. Chernetsova

Penza State University, Penza, Russia
chernetsovans@mail.ru

Abstract. *Background.* The condition for the viability of any socio-economic system is the growth of the standard of living of all strata of society, which depends on the degree of stability and positive dynamics of economic processes. The purpose of the study is to establish the dependence of the sustainable development of the economic system on the conditions

for the implementation of national economic interests by establishing the conjugation of the factors of positive dynamics of economic processes and the factors of the implementation of the system of economic interests. *Materials and methods.* To achieve this goal, general scientific and special methods were used: aggregation, abstraction, systematization of the analyzed material, grouping, modeling. The methodological basis of the study is based on the institutional-evolutionary concept and the system approach. *Results.* The concept of building a model of sustainable development of an economic system is presented on the basis of substantiation of the conjugation of the main characteristics and factors of sustainable development of economic systems and the process of implementation of national economic interests. *Conclusions.* Sustainable development of the economic system is a function of the realization of national economic interests, which provides opportunities for a relative resolution of the main contradiction of the economy between the growing needs of society and the limited resources of its resources.

Keywords: needs, resources, interest, national interests, sustainable development

For citation: Chernetsova N.S. Sustainable development of economic systems as a function of the system of economic interests. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):39–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-4

Введение

С появлением человечества на планете Земля войны стали неперенным условием первоначально просто выживания, а впоследствии – стремлением к обогащению одних народов за счет других. В историографии в качестве причин называют стремление к присвоению дополнительной рабочей силы – рабов, увеличению среды обитания народа, приобщение к своей идеологии и религии других народов с целью оказания на него давления в направлении решения собственных проблем.

С помощью военных действий расширялись территории, захватывались или жестко контролировались месторождения необходимых ресурсов, присваивались уже созданные богатства, захватывались рабы, используемые на самых трудоемких участках хозяйственной деятельности. Даже идеология и религия имели целью подчинение народов через переформатирование сознания, идеологических и религиозных установок.

В современных условиях эти причины продолжают действовать, влияя на геополитическую ситуацию, международные экономические отношения, положение на мировых рынках.

Примером служит процесс сохранения или установления контроля за регионами, богатыми природными ископаемыми, под предлогом внедрения «американской демократии», как правило, насильственными методами, приводящего к развязыванию локальных конфликтов в течение последних 50–60 лет.

Основная причина войн, в том числе современных военных конфликтов, ожесточенных информационных и экономических, санкционных войн – обострение краеугольного противоречия между неограниченностью потребностей и ограниченностью ресурсов. Это обострение – следствие стремительного роста населения планеты, особенно на азиатском континенте, с одной стороны, и позитивной динамики расширения мирового производственного процесса, требующего перманентного роста объема используемых ресурсов, с другой.

Причины войн: территории, деньги, рабы, представленные в историографии – в экономической теории трактуются как ресурсы, необходимые для

развития производства, обогащения элиты и в лучшем случае повышения степени удовлетворения потребностей населения страны, что, в свою очередь, свидетельствует об устойчивости национальной экономической системы.

Устойчивость социально-экономических систем зависит не только от внутренних для нее факторов, но и от совокупности внешних факторов, обеспечивающих возможность использования ресурсов, достаточных для удовлетворения растущих потребностей хозяйствующих субъектов: домохозяйств, фирм, государства и внешнего мира (рис. 1).



Рис. 1. Факторы устойчивого развития социально-экономической системы

Ограниченность национальных ресурсов вынуждала государства вести поиск за пределами собственной территории, что породило целую плеяду географических открытий и базу для завоевания слабо организованных народов. Первый механизм привлечения недостающих ресурсов на постоянной основе – колонизация. История мировой цивилизации свидетельствует о том, что в условиях колониального и неоколониального периодов устойчиво развивались исключительно метрополии, выкачивая ресурсы из попавших в зависимость стран. С распадом колониальной и снижением эффективности неоколониальной систем, с утратой значительной по своим масштабам ресурсной базы начала активизироваться реализация идеи глобализации.

Главными составляющими современной формы глобализма являются не столько военная, сколько экономическая и культурная экспансии, следствием которых становятся:

- система распределения природных, трудовых, интеллектуальных ресурсов планеты в угоду элит стран, стоящих во главе глобализационных процессов;
- ликвидация условий для реализации национальных интересов тех стран, население которых предано элитой, их подчинение интересам транснациональных корпораций и порождающим их государств;
- разрушение национальных производств за счет перераспределения ресурсной базы в пользу транснациональных компаний и ведущих государств и ограничения доступа к мировым ресурсным и товарным рынкам;

- утрата национальными экономиками способности к устойчивому росту;
- усиление социально-экономической дифференциации стран мира.

Основная причина всех современных военных конфликтов, ожесточенных информационных и экономических, санкционных войн – борьба за контроль за использованием ресурсов. Ресурсы, с одной стороны, – причина противостояния государств во все времена, а с другой, это важнейший фактор устойчивого развития социально-экономических систем.

Обсуждение

Основу формирования теории устойчивого развития экономических систем составили исследования причин, факторов, нарушающих стабильное, равновесное состояние системы, и условий, обеспечивающих преодоление неустойчивости (табл. 1).

Таблица 1

Эволюция теории устойчивого развития социально-экономической системы

Исследователи	Факторы устойчивости экономической системы
1	2
Маршал А. [1]	Устойчивость как результат соответствия: – потребностей и ресурсов; – спроса и предложения, устанавливаемого на основе действия ценового механизма; – эластичности спроса и предложения; – временного фактора
Вальрас Л. [2]	Анализ проблемы устойчивости на основе анализа соизмерения: – издержек фирм и цен на факторы производства, товары и услуги; – доходов и расходов домашних хозяйств; – обеспечения свободы конкуренции, стимулирующей подвижность факторов производства; – соизмерения потребления настоящего и будущего поколений
Кейнс Дж. [3]	Устойчивая позитивная экономическая динамика определяется двумя группами факторов: – объективными: соотношением объемов совокупных доходов и расходов; потребления, сбережения, инвестирования, занятости и др.; – субъективными: иерархии потребностей, привычек, ожидания, предпочтения ликвидности
Хикс Дж. [4]	Главные условия устойчивости экономической системы – соотношение и динамика совокупного потребления и сбережения, которые взаимосвязаны посредством интересов экономических субъектов
Кондратьев Н. Д. [5]	Систематизация базовых понятий: – равновесия, статики, динамики – и определение необходимости установления соотношения между ними; – устойчивость как тенденция к установлению нарушенного равновесия, основной фактор – конкуренция

1	2
Юровский Д. Н. [6]	Устойчивое динамическое состояние зависит: – от цен как фактора согласования интересов производителей и потребителей; – издержек производства как показателя взаимосвязи цен на ресурсы и потребительские товары; – степени развития конкуренции; – объема дохода и объема производства, спроса и предложения
Аузан А. А. [7] Никишина Е. Н. [8] Слуцкий Е. Е. [9] Кирдина С. Г. [10]	На основе методологии многофакторного анализа устойчивого развития определены важнейшие критерии устойчивости экономического развития, к которым отнесены: – перманентный рост степени удовлетворения потребностей; – тенденция к относительно равномерному росту дохода на душу населения; – отсутствие чрезмерной дифференциации доходов населения; – наличие механизмов саморазвития

В трактовке различными авторами устойчивости социально-экономической системы анализируются следующие факторы:

- потребности, ресурсы (А. Маршалл, В. Парето [11], Дж. Кейнс, А. А. Аузан, Е. Н. Никишина, Е. Е. Слуцкий, С. Г. Кирдина);
- доходы и расходы домохозяйств (Л. Вальрас, Дж. Кейнс, Д. Н. Юровский, А. А. Аузан, Е. Н. Никишина, Е. Е. Слуцкий, С. Г. Кирдина);
- спрос и предложение (А. Маршалл, Н. Д. Кондратьев, Д. Н. Юровский);
- конкуренция (Л. Вальрас, Н. Д. Кондратьев, Д. Н. Юровский);
- цены (А. Маршалл, Л. Вальрас, Д. Н. Юровский);
- национальные и экономические интересы (В. Парето, Дж. Хикс, Л. Н. Юровский).

На первый взгляд, это разные факторы, влияющие на устойчивое развитие социально-экономических систем, однако все они – порождение основных факторов: потребностей и ресурсов.

Спрос – это платежеспособная потребность.

Расходы – оплата товаров и услуг, обеспечивающих удовлетворение потребностей.

Предложение и доходы – это результат использования ресурсов.

Конкуренция – обострение противостояния интересов хозяйствующих субъектов.

Цена – это разрешение противостояния интересов покупателей и продавцов.

Таким образом, основные факторы устойчивого развития социально-экономических систем, выявленные ведущими исследователями данной проблемы, сводятся к трем понятиям, которые неразрывно связаны между собой: потребности, ресурсы и экономические интересы. Потребности и ресурсы –

составляющие экономического интереса, носителем которого является экономический субъект.

Субъектами экономических интересов выступают хозяйствующие субъекты различного уровня: домохозяйства; коллективы предприятий, организаций; социальные группы; региональные (территориальные) образования; национальные государства.

Экономического субъекта отличает ряд свойств, к которым относятся:

- экономическая обособленность;
- относительная зависимость от действующих систем общественных, экономических отношений и институтов;
- относительная автономность;
- наличие совокупности потребностей;
- обладание определенным объемом и качеством ресурсов;
- рациональность;
- обладание определенными компетенциями;
- наследственный или приобретенный социальный статус [12, 13].

Важнейшее свойство субъекта, функционирующего в экономике, – экономический интерес – в данном перечне отсутствует. Вместе с тем его фактически обслуживают все остальные признаки.

Анализ экономического интереса в советской экономической литературе базировался вокруг двух понятий: «потребность» и «экономическое отношение». При этом происходит отождествление интересов и осознанных экономическими субъектами потребностей или их форм [14, с. 10]. И. Сигов трактует интересы как «осознанные обществом, социальными классами и индивидами потребности» [15, с. 75].

Широкое распространение приобрело отождествление интересов с производственными отношениями, в которые вступают экономические субъекты. Так, в исследовании Ю. Палкина утверждается, что «система всех экономических интересов на базе определенной формы собственности и представляет ту их совокупность, которая трактуется как категория "производственные отношения"» [16, с. 36]. Данная трактовка опирается на высказывание Ф. Энгельса: «Экономические отношения каждого данного общества проявляются прежде всего как интересы» [17, с. 271]. Вместе с тем автор подчеркивает, что интерес проявляется через экономические отношения, имея собственную сущность, т.е. понятия «интерес» и «экономические отношения» не тождественны.

Безусловно, экономические интересы и экономические отношения неразрывно связаны, но не подменяют друг друга. Более того, эта связь невозможна без важнейшего компонента – ресурсов, которым обладают экономические субъекты.

Прежде всего это способность к труду, которая развивается в процессе получения теоретических знаний и использования их в практической деятельности, увеличивая набор компетенций и повышая квалификацию. К ресурсам также относятся: земля, средства производства, финансовые средства. Рациональность, определенная степень компетентности позволяют субъекту таким образом распорядиться своими ресурсами, чтобы максимально удовлетворить свои потребности (рис. 2).

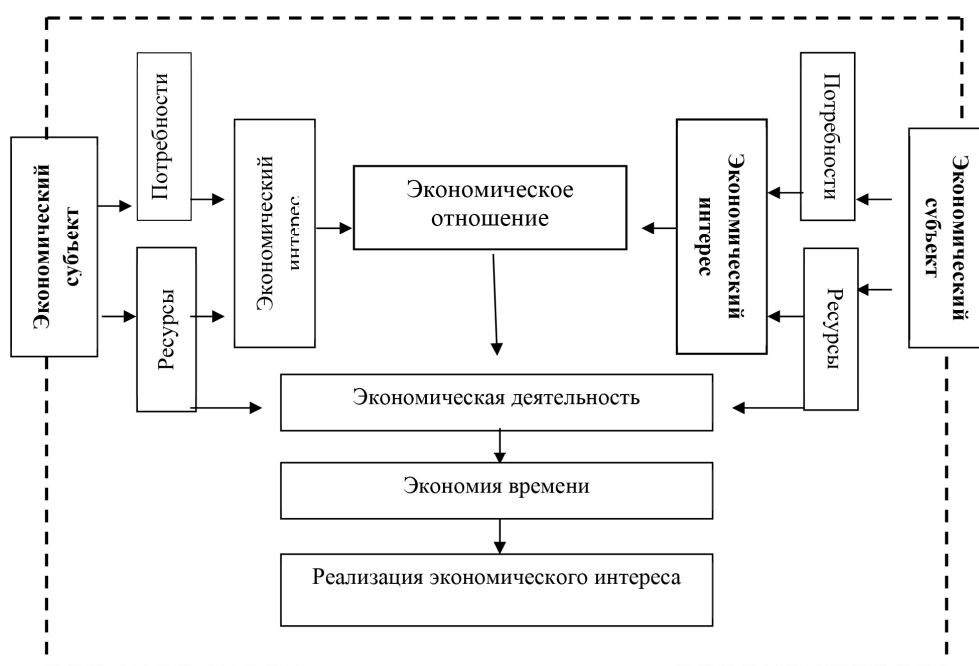


Рис. 2. Модель формирования и реализации экономических интересов

Данная модель отражает сущность экономического интереса как свойства субъекта экономики, которая состоит в «целевой направленности экономической деятельности на повышение степени удовлетворения присущих ему потребностей за счет эффективного применения находящихся в его распоряжении ресурсов и проявляющееся в экономии времени» [18, с. 50].

Следовательно, взаимодействие интересов, ресурсов и потребностей неоднозначно: не всякая удовлетворенная потребность приближает к реализации интереса. Экономический интерес оказывается реализованным только при условии экономии времени. Если это условие не выполняется, деформируется процесс реализации интереса, что приводит к разбалансированности, неустойчивости экономической системы в целом.

В качестве основного критерия реализации интересов выступает позитивная тенденция к росту степени удовлетворения потребностей при оптимальном расходовании ресурсов, которая является функцией временных параметров:

- производительности труда как объема затрат ресурсов и выпуска в единицу времени;
- конкретного сочетания всех структурных элементов производственного процесса в пространстве и во времени как формы организации производства, предусматривающей рост выпуска с единицы ресурсов;
- распределения национального продукта, важнейшей функцией которого является стимулирование деятельности экономических субъектов, обеспечивающее экономию времени;
- величины спроса, обусловливаемой уровнем доходов, объема произведенной продукции, определяемого затратами ресурсов.

Таким образом, экономия времени является важнейшим параметром процесса реализации экономических интересов. Данную объективную связь обосновывал академик Л. И. Абалкин: «Экономические интересы связаны в конечном счете с действием закона экономии времени и выражаются в суммарной экономии совокупных затрат рабочего времени» [19, с. 136].

Различия потребностей, материальных и нематериальных ресурсов в распоряжении хозяйствующих субъектов формируют различные национальные, коллективные и личные экономические интересы.

Национальные интересы – это результат синергетического эффекта взаимодействия интересов индивидов, производственных коллективов, различных социальных групп.

Устойчивость и стабильность социально-экономической системы определяется степенью эффективности аккумуляции государством коллективных, личных, групповых интересов и выявление на этой основе совокупности национальных интересов, приобретающих форму государственных.

Проблемы национальных интересов приобрели особое значение в результате заключения Вестфальского мира по окончании Тридцатилетней войны в 1648 г., базировавшегося на реализации идеи национального государства и принципа национального суверенитета.

Вестфальская система стала государственно-центричной системой международных отношений, главным субъектом которой стало суверенное государство, основным мотивом деятельности которого на международной арене становятся защита, обеспечение реализации национальных интересов.

Глобализация фактически разрушает основы Вестфальского мира, поскольку процесс глобализации предполагает формирование глобального центра регулирования, который должен обеспечить условия для реализации интересов национальных государств. Глобализация не оставляет места для интересов национальных государств, заменяет их интересами мирового гегемона.

Факторы, способствующие ликвидации условий реализации национальных интересов стран:

- перераспределение трудовых, материальных, сырьевых ресурсов в пользу стран-лидеров глобализации;
- отсутствие средств как экономического, так и военного противостояния этим процессам;
- предательство национальных интересов элитой, находящейся на содержании инициаторов глобализации.

Вместе с тем национальные интересы играют особую роль, определяя состояние, здоровье общества. По мнению Гельвеция, «мира и благополучия в обществе возможно достичь благодаря общественным, общенациональным интересам, отражающим зависимость между сословиями граждан» [20, с. 247].

Современная геополитическая ситуация показывает, что мир не готов к передаче прав государства глобальному центру. Во-первых, современные государства – субъекты международных отношений – имеют уникальные параметры, касающиеся масштабов территории, климатических условий, природных ресурсов и возможностей их освоения, численности и качества трудовых ресурсов, менталитета, культурных и религиозных предпочтений, уровня социально-экономического развития.

Но самое главное заключается в том, что сбалансированность национальных экономических интересов и наличие достаточных условий для их

реализации определяют возможности устойчивого развития социально-экономической системы. Эффективное использование ресурсов, обеспечивающее экономию времени в целях максимального удовлетворения растущих потребностей населения, создает предпосылки, с одной стороны, для успешной реализации национальных экономических интересов, а с другой, для устойчивого развития социально-экономической системы.

Важнейшая задача государства, являющегося субъектом национальных (общественных, государственных) экономических интересов, состоит в обеспечении условий для их реализации через государственную экономическую политику, которая выполняет многофункциональную роль:

- формы проявления и фиксирования национальных экономических интересов;
- механизма установления приоритета потребностей;
- механизма определения и выбора способов реализации национальных экономических интересов, обеспечивающих экономию времени.

Данная роль государственной экономической политики окажется действенной при условии четкого следования поэтапному процессу выявления и функционирования национальных экономических интересов:

- определение сущности как совокупности ресурсов и потребностей «в качестве взаимной зависимости индивидов, между которыми разделен труд» [21, с. 31];
- выявление связи осознанных потребностей общества с наиболее результативными способами их удовлетворения;
- проявление интересов в качестве конкретных действий, обеспечивающих экономию времени;
- кристаллизация в социальных институтах, обеспечивающих механизмы реализации национальных экономических интересов.

В табл. 2 представлены многоуровневая характеристика экономического интереса, а также параметры устойчивого развития экономической системы, критерий которого – разрешение концептуального противоречия между непрерывно возрастающими объемами совокупных потребностей и ограниченностью ресурсов, невосполнимых в значительном числе случаев [18, с. 55–59].

Реализация системы национальных экономических интересов обеспечивает относительное преодоление данного противоречия, предоставляя необходимые условия для устойчивого развития посредством:

- институционального механизма функционирования и развития субъектов экономики;
- форм организации институциональной среды на основе институционализации однотипных интересов, нормативное их оформление в качестве национальных институтов: государственные структуры, банковский сектор, финансовые учреждения и др.;
- оптимальных моделей поведения хозяйствующих субъектов, обусловливаемых свойствами рациональности и компетентности.

Современные геополитические проблемы – результат противоречия процесса глобализации и реализации национальных интересов большинства стран мира. Углубление данного противоречия проявляется в усилении социально-экономической дифференциации стран мира по социально-экономическим показателям.

Таблица 2

Сопряженность параметров устойчивого развития экономической системы и характерных черт экономических интересов

Параметры устойчивого развития	Характеристика экономического интереса
Эффективное распоряжение ресурсами на основе определения наилучшего варианта их использования	Свойство экономического субъекта, выбирающего оптимальный вариант использования ресурсов
Позитивная динамика процесса функционирования системы экономических отношений	Составляющая механизма развития экономического отношения, определяющая возможности его возобновления, устойчивости
Сопряженность целей экономической системы и сущностных характеристик совокупности национальных экономических интересов	Стимул, который либо совпадает с целями социально-экономической системы, либо вступает с ними в противоречие, влияя на степень ее устойчивости
Экономия времени, отражающаяся в производительности труда, формах организации производства, принципах распределения и условиях обмена, реализуется в затратах, объемах выпуска и доходах, имеющих временные показатели	Экономия времени – субстанциональная характеристика, являющаяся критерием реализации интереса, временные потери деформируют процесс реализации интересов, усиливается проявление неустойчивости системы экономических отношений и экономической системы в целом

Уровень жизни населения бывших колоний, из которых в течение длительного времени выкачивались ресурсы, а в настоящее время продолжается давление посредством методов глобализации, закрепляющих зависимость от стран, входящих в совокупную метрополию, лишаящих суверенитета и условий реализации национальных, в том числе экономических интересов, в значительной степени отстает от аналогичных показателей ведущих стран мира (табл. 3) [22].

Таблица 3

ВВП на душу населения стран в 2023 г. (в долл. США)

Страна	ВВП на душу населения	Страна	ВВП на душу населения
Норвегия	95 510	Бурунди	240
Люксембург	91 200	Сомали	410
Швейцария	89 450	ЦАР	480
США	76 370	Мозамбик	500
Дания	73 200	Конго (ДР)	590
Швеция	62 990	Эритрея	610
Австрия	56 140	Нигер	610
Финляндия	54 360	Чад	690
Германия	53 390	Южный Судан	760
Канада	52960	Гвинея-Бисау	810
Великобритания	48 890	Буркина-Фасо	840
Франция	45 860	Йемен	840
Средний показатель	$800\,320 : 12 = 66\,693$	Средний показатель	$7470 : 12 = 622,5$

Как следует из данных табл. 3, в 2023 г. уровень жизни жителей бывших колоний, зависящий от результативности экономических процессов, значительно отстает от уровня жизни населения метрополий. Средний показатель ВВП на душу населения США и ряда европейских стран более чем в 107 раз превышает этот показатель в группе получивших независимость государств. Особенно беспокоит сохраняющаяся тенденция к углублению дифференциации, проявляющаяся в динамике ВВП на душу населения за последние 10 лет: для ведущих стран характерен существенный рост, а для группы отстающих – падение.

Так, в период с 2013 по 2023 г. прирост ВВП на душу в европейских странах составил:

- в Дании – 59,0 %;
- Нидерландах – 46,8 %;
- Германии – 45,8 %.

В бывших колониях показатель ВВП на душу населения в этот период сократился:

- в Республике Конго – на 21,6 %;
- Йемене – на 42,3 %;
- Южном Судане – на 72,6 % [23].

Данная тенденция подтверждает взаимозависимость суверенитета государства и устойчивого развития, позитивный результат которой проявляется:

- через обеспечение реализации национальных экономических интересов;
- сбалансированность системы национальных интересов посредством согласования интересов различных групп экономических субъектов.

Проведенный анализ позволяет представить концепцию построения модели устойчивого развития экономического объекта, в том числе национальной, региональной, городской экономики, согласно которой необходимо:

- выстроить оптимальную иерархию взаимозависимых потребностей;
- провести анализ ресурсов, обеспечивающих возможность удовлетворения максимального объема потребностей, и технологий их использования;
- определить экономических субъектов с сопряженными интересами, отношения с которыми обеспечат восполнение недостающих ресурсов;
- провести анализ затрат и результатов запланированного взаимодействия с учетом экономии времени;
- скорректировать стратегию на будущее с учетом эффективности использования ресурсов и масштабов экономии времени.

Заключение

Представляется, что переход к многополярному геополитическому устройству мира позволит государствам объединиться вокруг ведущих региональных держав и совместными усилиями преодолевать негативные последствия глобализации. Это позволит создать условия для сохранения суверенитета и реализации национальных экономических интересов как основного фактора устойчивого развития социально-экономической системы.

Список литературы

1. Маршалл А. Принципы экономической науки : в 3 т. М. : Прогресс, 1993.
2. Вальрас Л. Элементы чистой политической экономии. М. : Изограф, 2000.
3. Кейнс Дж. М. Общая теория занятости, процента и денег. Избранное. М. : Эксмо, 2007.
4. Хикс Дж. Р. Основания экономики благосостояния // Вехи экономической мысли. Т. 4. Экономика благосостояния и общественный выбор / под общ. ред. А. П. Заостровцева. СПб. : Экономическая школа, 2004. С. 17–38.
5. Кондратьев Н. Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения / сост. Ю. В. Яковец. М. : Экономика, 2002.
6. Юровский Д. Н. Денежная политика советской власти (1917–1927). Избранные статьи. М. : Начала-Пресс, 1996.
7. Аузан А. Экономика всего. Как институты определяют нашу жизнь. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2013. 160 с.
8. Никишина Е. Н. Культурный капитал как фактор неопределенности и транзакционных издержек // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2015. № 5. С. 1–20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kulturnyy-kapital-kak-faktor-neopredelennosti-i-transaktsionnyh-izderzhok/viewer> (дата обращения: 12.04.2024).
9. Слуцкий Е. Экономические и статистические произведения: избранное / пер. с нем., итал., франц., англ., предисл. П. Н. Ключкина. М. : Эксмо, 2010.
10. Кирдина С. Г. Трудовые отношения в редистрибутивных экономиках: случай России // Политика социального партнерства (российский и зарубежный опыт) / отв. ред. М. В. Каргалова, К. Д. Крылов. М. : ТК Велби : Проспект, 2003. С. 37–55.
11. Парето В. Социалистические системы // Теоретическая социология : антология : в 2 т. / сост., науч. ред., предисл. С. П. Баньковской. М. : Книжный дом «Университет», 2002. Т. 1.
12. Мамедов О. Ю. Социалистическое производственное отношение. Ростов н/Д. : Изд-во РГУ, 1983. С. 38–41.
13. Радаев В. В. Экономические и социологические концепции хозяйственного поведения человека: сравнительное исследование : автореф. дис. ... д-ра экон. наук. М., 1997.
14. Кулиев Т. А. Проблема интересов в социалистическом обществе. М. : Мысль, 1967. С. 10.
15. Сигов И. Интересы и управление // Экономические науки. 1991. № 4. С. 75.
16. Палкин Ю. И. Интересы в системе экономических отношений социализма. Киев : Наукова думка, 1974. С. 36.
17. Энгельс Ф. Еще раз о Прудоне и жилищном вопросе // Маркс К., Энгельс Ф. Сочинения. 2-е изд. М. : Государственное изд-во политической литературы, 1961. Т. 18. С. 271.
18. Чернецова Н. С. Теория и методология исследования экономических интересов. М. : МИЭМ : УЧЛИТВУЗ, 2001. С. 50.
19. Мировое социалистическое хозяйство: вопросы политической экономии / под ред. О. Богомолова. М. : Экономика, 1987. С. 136.
20. Гельвеций К. О человеке, его умственных способностях и его воспитании. М., 1938. С. 159.
21. Маркс К., Энгельс Ф. Немецкая идеология // Сочинения. Т. 3. С. 31.
22. Глобальный рейтинг экономик по показателю валового национального дохода на душу населения. URL: <https://gtmarket.ru/ratings/gross-national-income-ranking>
23. Валовой внутренний продукт на душу населения в странах мира (МБФ; по паритету покупательной способности). URL: <https://svspb.net/danmark/vvp-stran-na-dushu-naselenija.php> (дата обращения: 12.04.2024).

References

1. Marshall A. *Printsipy ekonomicheskoy nauki: v 3 t. = Principles of economic science : in 3 volumes*. Moscow: Progress, 1993. (In Russ.)
2. Val'ras L. *Elementy chistoy politicheskoy ekonomii = Elements of pure political economy*. Moscow: Izograf, 2000. (In Russ.)
3. Keynes J.M. *Obshchaya teoriya zanyatosti, protsenta i deneg. Izbrannoe = General theory of employment, interest and money. Selected works*. Moscow: Eksmo, 2007. (In Russ.)
4. Hicks J.R. Foundations of welfare economics. *Vekhi ekonomicheskoy mysli. T. 4. Ekonomika blagosostoyaniya i obshchestvennyy vybor = Milestones of economic thought. Vol. 4. Economics of welfare and public choice*. Saint Petersburg: Ekonomicheskaya shkola, 2004:17–38. (In Russ.)
5. Kondrat'ev N.D. *Bol'shie tsikly kon'yunktury i teoriya predvideniya = Large cycles f conjuncture and theory of foresight*. Moscow: Ekonomika, 2002. (In Russ.)
6. Yurovskiy D.N. *Denezhnaya politika sovetской vlasti (1917–1927). Izbrannye stat'i = Monetary policy of the Soviet government (1917–1927). Selected articles*. Moscow: Nachala-Press, 1996. (In Russ.)
7. Auzan A. *Ekonomika vsego. Kak instituty opredelyayut nashu zhizn' = Economics f everything. How institutions define our lives*. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2013:160. (In Russ.)
8. Nikishina E.N. Cultural capital as a factor of uncertainty and transaction costs. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika = Bulletin of the Moscow University. Series 6. Economics*. 2015;(5):1–20. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kulturnyy-kapital-kak-faktor-neopredelennosti-i-transaktsionnyh-izderzhek/viewer> (accessed 12.04.2024).
9. Slutskiy E. *Ekonomicheskie i statisticheskie proizvedeniya: izbrannoe / per. s nem., ital., frants., angl., predisl. P.N. Klyukina = Economic and statistical works: selected works / translated from German, Italian, French, English, preface by P. N. Klyukin*. Moscow: Eksmo, 2010. (In Russ.)
10. Kirdina S.G. Labor relations in redistributive economies: the case of Russia. *Politika sotsial'nogo partnerstva (rossiyskiy i zarubezhnyy opyt) = Policy of social partnership (Russian and foreign experience)*. Moscow: TK Velbi: Prospekt, 2003:37–55. (In Russ.)
11. Pareto V. Socialist systems. *Teoreticheskaya sotsiologiya: antologiya: v 2 t. = Theoretical sociology: an anthology : in 2 volumes*. Moscow: Knizhnyy dom «Universitet», 2002;1. (In Russ.)
12. Mamedov O.Yu. *Sotsialisticheskoe proizvodstvennoe otnoshenie = Socialist industrial relations*. Rostov-on-Don: Izd-vo RGU, 1983:38–41. (In Russ.)
13. Radaev V.V. *Economic and sociological concepts of human economic behavior: a comparative study*. DSc abstract. Moscow, 1997. (In Russ.)
14. Kuliev T.A. *Problema interesov v sotsialisticheskoy obshchestve = The problem of interests in a socialist society*. Moscow: Mysl', 1967:10. (In Russ.)
15. Sigov I. Interests and management. *Ekonomicheskie nauki = Economic sciences*. 1991;(4):75. (In Russ.)
16. Palkin Yu.I. *Interesy v sisteme ekonomicheskikh otnosheniy sotsializma = Interests in the system of economic relations of socialism*. Kiev: Naukova dumka, 1974:36. (In Russ.)
17. Engel's F. Once again about Proudhon and the housing issue. *Marks K., Engel's F. Sochineniya. 2-e izd. = K. Marx, F. Engels. Essays. 2nd ed. . Moscow: Gosudarstvennoe izd-vo politicheskoy literatury, 1961;18:271*. (In Russ.)
18. Chernetsova N.S. *Teoriya i metodologiya issledovaniya ekonomicheskikh interesov = Theory and methodology of economic interests research*. Moscow: MIEM: UCh-LITVUZ, 2001:50. (In Russ.)

19. Bogomolov O. (ed.). *Mirovye sotsialisticheskoe khozyaystvo: voprosy politicheskoy ekonomii* = *World socialist economy: issues of political economy*. Moscow: Ekonomika, 1987:136. (In Russ.)
20. Gel'vetsiy K. *O cheloveke, ego umstvennykh sposobnostyakh i ego vospitanii* = *About man, his mental abilities and his upbringing*. Moscow, 1938:159. (In Russ.)
21. Marks K., Engel's F. German ideology. *Sochineniya* = *Works*. 1955;3:31. (In Russ.)
22. *Global'nyy reyting ekonomik po pokazatelyu valovogo natsional'nogo dokhoda na dushu naseleniya* = *Global ranking of economies in terms of gross national income per capita*. (In Russ.). Available at: <https://gtmarket.ru/ratings/gross-national-income-ranking>
23. *Valovoy vnutrenniy produkt na dushu naseleniya v stranakh mira (MVF; po paritetu pokupatel'noy sposobnosti)* = *Gross domestic product per capita in the countries of the world (IMF; purchasing power parity)*. (In Russ.). Available at: <https://svspb.net/dan-mark/vvp-stran-na-dushu-naseleniya.php> (accessed 12.04.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Надежда Сергеевна Чернецова

доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры социологии,
экономической теории
и международных процессов,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chernetsovans@mail.ru

Nadezhda S. Chernetsova

Doctor of economical sciences, professor,
professor of the sub-department
of sociology, economic theory
and international processes,
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 11.08.2024

Поступила после рецензирования/Revised 28.08.2024

Принята к публикации/Accepted 03.09.2024

Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

УДК 004.042

doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-5

ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ (PROCESS MINING)

М. И. Кревский¹, А. С. Бождай²

^{1, 2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Process Mining – молодое, динамически развивающееся направление науки о данных. Подход к аналитике организационных процессов, основанный на данных, уже успел доказать свою эффективность и продолжает набирать популярность в крупных компаниях. Цель исследования – обзорный анализ существующих теоретических и практических решений в сфере управления бизнес-процессами с целью выработки полезных рекомендаций, способствующих созданию отечественных интеллектуальных систем управления организационными процессами на основе процессной аналитики данных. *Материалы и методы.* Представлен обзор материалов международных конференций и статей, посвященных исследованию организационных процессов. Рассмотрены методы оценки качества стохастических моделей процессов, выравнивания путей бизнес-процессов, предиктивного анализа, анализа событийных данных и способы рекомендательного сопровождения бизнес-процессов. *Результаты.* Проанализированы современные подходы к каждому типу задач технологии Process Mining. Применение рассмотренных идей и методов на практике позволит существенно расширить функциональность систем аналитики процессов, использующих только классические методы Process Mining, с высокой точностью прогнозировать ход выполнения процесса, избежать потерь информации, обеспечить прозрачность и обоснованность предлагаемых изменений. *Выводы.* Существующие к настоящему моменту научно-технологические решения Process Mining позволяют эффективно автоматизировать большую часть задач, стоящих перед бизнес-аналитиками как государственного сектора, так и частного бизнеса. Однако эти решения далеки от полной завершенности и оставляют пространство для развития и усовершенствования аналитических инструментов процессной и предиктивной аналитики.

© Кревский М. И., Бождай А. С., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: Process Mining, управление организационными процессами, бизнес-процесс, модель бизнес-процесса, стохастическая модель, конечные автоматы, гиперграфы, объяснимый искусственный интеллект, предиктивная аналитика

Для цитирования: Кревский М. И., Бождай А. С. Обзор и анализ современных научно-технологических решений управления организационными процессами (Process Mining) // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 53–72. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-5

REVIEW AND ANALYSIS OF MODERN SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR MANAGING ORGANIZATIONAL PROCESSES (PROCESS MINING)

M.I. Krevskiy¹, A.S. Bozhday²

^{1, 2} Penza State University, Penza, Russia

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

Abstract. *Background.* Process Mining is a young, dynamically developing field of data science. This data-driven approach to process analytics has already proven its effectiveness and is increasingly gaining popularity in large companies. The purpose of this article is a review analysis of existing theoretical and practical solutions in the field of business process management in order to develop useful recommendations that will facilitate the creation of domestic intelligent systems for managing organizational processes based on process data analytics. *Materials and methods.* The paper examines the materials of international conferences devoted to process analytics. The methods of assessing the quality of stochastic process models, alignment of business process paths, predictive analysis, event data analysis and methods of advisory support of business processes are considered. *Results.* In the course of the work, modern approaches to each type of task in Process Mining are analyzed. The application of the ideas and methods discussed in this review in practice will significantly expand the functionality of process analytics systems using only classical Process Mining methods, predict the progress of the process with high accuracy, avoid information loss, ensure transparency and validity of the proposed changes. *Conclusions.* The currently existing scientific and technological solutions of Process Mining make it possible to effectively automate most of the tasks business analysts face in both the public sector and private business. However, these solutions are far from complete and leave room for the development and improvement of analytical tools for process and predictive analytics.

Keywords: Process Mining, organizational process management, business process, business process model, stochastic model, finite state machines, hypergraphs, explicable artificial intelligence, predictive analytics

For citation: Krevskiy M.I., Bozhday A.S. Review and analysis of modern scientific and technological solutions for managing organizational processes (Process Mining). *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):53–72. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-5

Введение

В связи с необходимостью повышения эффективности управления организационными системами в последние годы значительно возрос интерес аналитиков к технологии *Process Mining* (ПМ). *Process Mining* – это метод анализа данных, используемый для извлечения, мониторинга и улучшения процессов,

основанный на применении цифровых следов в информационных системах. Он позволяет пользователям подробно изучать бизнес-процессы с использованием инструментов визуализации и машинного обучения. В условиях растущей конкуренции использование РМ становится неотъемлемым элементом успешной стратегии развития любого сложного организационного процесса. С целью удовлетворения непрерывно растущих требований к качеству и доступности цифровых государственных и коммерческих услуг использование технологии РМ в инновационных системах интеллектуального анализа бизнес-процессов (БП) приобретает особую актуальность.

Данное исследование содержит обзор последних исследований и достижений в области РМ, которые представляют особый практический интерес. В связи с малым количеством отечественных исследований в этой сфере основная часть ссылок будет приходиться на исследования зарубежных специалистов. Анализ опубликованных работ и материалов международных конференций позволит выявить передовые методы и подходы в области анализа БП, сформировать практические рекомендации для заинтересованных лиц, принимающих решения в различных прикладных областях управления организационными системами. Кроме того, поскольку данная работа предоставляет обзор текущего состояния развития технологии РМ, она может быть полезна техническим специалистам отделов и организаций, занимающихся или планирующих заняться оптимизацией бизнес-процессов.

Материалы и методы

Наиболее характерными сферами применения РМ являются крупные государственные и корпоративные информационные системы, в которых одновременно обрабатываются огромные массивы процессов, связанных с различными источниками данных. Примерами могут служить портал государственных услуг, системы учета клиентов крупных торговых, банковских, телекоммуникационных, ведомственных структур. Так, в случае с цифровым оказанием государственных услуг весь комплекс организационных процессов укрупненно можно распределить по следующим группам:

- организация постоянного мониторинга технического состояния систем и соблюдение административного регламента при оказании государственных услуг;
- анализ работы конкретных госуслуг, выделение проблемных кейсов, поиск неэффективности в процессе и доведение до владельцев процесса соответствующих рекомендаций;
- поиск узких мест процессов для формирования предложений по введению автоматизации и применению искусственного интеллекта;
- выделение закономерностей между использованием услуг, профилями пользователей, их предыдущими действиями;
- выделение трендов, предсказание дальнейшего поведения процесса, прогнозирование нагрузок и поведения системы;
- визуализация процессов, обобщение сведений о системе оказания госуслуг в целом и ее отдельных частях, подсчет статистических показателей, генерация наглядных графиков и информационных панелей, отправка уведомлений об инцидентах ответственным сотрудникам, информационное сопровождение принятия решений.

Перечисленные процессы могут быть эффективно автоматизированы при помощи существующих к настоящему моменту научно-технологических решений РМ, которые позволяют выполнять:

- извлечение процессов (*Process Discovery*) – извлечение и визуализация бизнес-процессов на основе журналов событий;
- анализ соответствия (*Conformance Checking*) – сравнение реальных процессов с эталонными регламентированными моделями для выявления несоответствий;
- оптимизацию процессов (*Process Enhancement*) – обнаружение узких мест и неэффективных этапов для последующего улучшения и оптимизации сложных организационных последовательностей;
- мониторинг и контроль (*Process Monitoring & Control*) – непрерывное наблюдение за процессами для своевременного выявления проблем и отклонений;
- предсказание и прогнозирование (*Predictive Analytics*) – прогнозирование будущих событий и тенденций на основе исторических данных для проактивного управления процессами.

Активные исследования в области технологии РМ помогают разрабатывать новые методы и инструменты для анализа и оптимизации БП. Существенный вклад в эту работу внесли авторы следующих материалов.

Статьи [1–7] посвящены изучению качества стохастических моделей процессов. При описании организационного процесса этот тип модели явно включает вероятностные характеристики различных аспектов и параметров процесса, что упрощает различные режимы анализа и моделирования. Таким образом, стохастические модели позволяют учитывать неопределенность и вариативность в БП, что делает их особенно полезными при управлении рисками и поиске компромиссов.

После создания моделей организационного процесса правильность их использования зависит от оценки качества этих моделей и способности сравнивать их между собой. Для процесса может существовать не единственная оптимальная стохастическая модель, а множество моделей с различными свойствами и релевантными сферами применения. Чтобы оценить модель, необходимы количественные показатели и понимание их взаимосвязи. Статья «*Stochastic Process Model-Log Quality Dimensions: An Experimental Study*» [1] представляет собой эмпирическое исследование мер для моделей случайных процессов, построенных на основе реальных журналов событий. Экспериментальным путем составлена большая коллекция моделей, построенных как случайным образом, так и с помощью методов *Process Mining* для обнаружения процессов.

На основе выполненного анализа предлагаются три ключевые меры качества стохастических моделей: адгезия, энтропия и простота. Адгезия характеризует соответствие модели реальным данным, что позволяет определить степень точности модели. Энтропия дает оценку сложности и предсказуемости модели, что необходимо для понимания структуры процесса и его устойчивости к изменениям. Простота является критерием легкости понимания и использования модели. Эти меры для модели процесса являются важнейшими факторами при ее внедрении в практическую деятельность организации. Три меры качества стохастических моделей, предложенные в работе [1], позволяют

оценивать текущие модели, сравнивать их между собой, принимать решение в пользу одной из них или прибегать к компромиссу между моделями. Такое оценочное решение иногда может быть критически важным при выборе наиболее подходящей модели для решения конкретной проблемы.

По мнению автора обзора, применение стохастических моделей может быть использовано для решения задач извлечения процессов с иной, вероятностной точки зрения, а также учитывать вариативность при оптимизации процессов и нахождении узких мест. Использование рассмотренных в работах [1–7] показателей качества стохастических процессных моделей и их взаимосвязей для оценки качества моделей БП заслуживает внимания и тщательного изучения для возможного применения в собственной разработке.

В статье «*Context-Aware Trace Alignment with Automated Planning*» [8] рассматривается вариант решения проблемы выравнивания путей бизнес-процессов. Выравнивание путей – это задача поиска оптимально возможной последовательности выполнения модели БП, которая воспроизводит реальный путь выполнения того же БП, точно определяя места его отклонения. Традиционные методы выравнивания [9–15] часто используют статичные функции стоимости отклонений, что может приводить к упрощению анализа и недостаточному учету контекста выполнения процессов. Авторы статьи [8] предлагают метод, который учитывает контекст отклонений, что позволяет более точно оценивать влияние этих отклонений на процесс.

Новый метод основан на использовании детерминированных конечных автоматов для построения оптимальных выравниваний, управляемых специальными моделями стоимости, которые назначают зависящие от контекста затраты на отклонения. Это позволяет учитывать различные факторы, влияющие на выполнение процесса, и более точно моделировать реальные условия. В статье [8] задача выравнивания путей сначала превращается в задачу построения для модели бизнес-процесса, учитывающего контекст, конечного автомата и соответствующей модели стоимости отклонений. Затем авторы показывают, как такая формулировка сводится к детерминированной задаче планирования. Кроме того, предлагается использование методов автоматизированного планирования из области искусственного интеллекта, доказавших свою эффективность для выполнения задач выравнивания даже для крупных моделей и журналов событий. Такой подход обеспечивает высокую производительность и масштабируемость анализа.

Важно учитывать контекстно зависимые отклонения при выравнивании путей. Создание функции стоимости отклонений, которая учитывает контекст выполнения БП, предоставит возможность более точно оценивать влияние отклонений на процесс. Это позволит обрабатывать большие объемы данных и строить оптимальные выравнивания даже для крупных моделей и журналов событий. Такой подход особенно важен для сложных и динамичных систем, где традиционные методы могут быть недостаточно точными.

В исследовании [8] решается целый ряд задач РМ: извлечение процесса в виде ориентированного на контекст конечного автомата; выравнивание путей (обычно применяется в анализе соответствия, когда сопоставляются пути эталонного и реального процессов). Отсюда вытекает третье применение: при непрерывном использовании выравнивание может применяться при мониторинге отклонений.

Современные исследования в области Process Mining предлагают новые методы и подходы для прогнозирования и мониторинга бизнес-процессов. В области предиктивного анализа процессов особого внимания заслуживают материалы [16–29].

Статья «*Towards next-location prediction for process executions*» [16] фокусируется на предсказании следующих активностей текущего процесса. Большинство известных подходов [17–22] стремится точно предсказать активность, которая будет реализована, исходя из текущего состояния процесса. Например, если процесс содержит петли или параллельные ветви, аналитику была бы полезна информация о том, по какому этапу и с какой вероятностью пойдет его дальнейшее развитие. Это особенно актуально, если выбор следующего этапа равновероятен, так как реальные процессы могут представлять собой сложные комбинации конструкций управления потоком с множеством действий и вариантов. Авторы работы [16] предлагают метод, направленный на предсказание этапа текущего процесса (или «локации»), который вероятно будет выполнен следующим. Неформально локацией назван набор активностей с одинаковыми структурными особенностями, определенный на основе шаблонов рабочего процесса, обычно используемых при моделировании процессов [16]. Концепция «локации» позволяет выявлять действия, принадлежащие одной и той же части конструкции управления потоком. Такой подход обеспечивает более высокий уровень абстракции и позволяет аналитикам процессов получить более общее представление о том, что можно ожидать от дальнейшего хода выполнения процесса. Метод был опробован на наборе данных, включающем пять реальных журналов событий, а также были рассмотрены различные варианты обучения классификатора для определения локаций по метке активности.

Проведенный обзор ряда статей на тему предиктивного анализа процессов [23–29] выявил, что большинство исследований используют рекуррентные нейронные сети для кодирования последовательности событий без учета структуры самого процесса. Однако процессы часто содержат сложные конструкции управления потоком, такие как параллелизм и циклы. Это создает проблемы при распознавании потенциальных связей между высокоуровневыми конструкциями управления потоком и целевым предсказанием. Статья «*Encoding High-Level Control-Flow Construct Information for Process Outcome Prediction*» [23] посвящена предсказанию исхода процесса на основе текущих данных о его выполнении. Авторы предлагают оригинальный подход, который кодирует информацию о конструкциях управления потоком, к которым относится каждое событие. Сначала они используют методы локального процессного моделирования для извлечения часто встречающихся паттернов управления потоком из журнала событий, затем применяют различные методы кодирования для обогащения текущего выполнения процесса информацией о выявленных паттернах. Эксперименты на девяти реальных журналах событий показали устойчивые улучшения в точности предсказаний.

Анализ статей [16–29] о предиктивном анализе организационных процессов позволяет сделать выводы практического характера, полезные при решении следующих задач:

1. Вероятностная оценка возможности следующей локации: включение механизма предсказания не конкретной следующей активности, а части процесса (локации), которая будет выполнена следующей с определенной

вероятностью. Это позволит аналитику получить более общее представление о будущем ходе выполнения процесса.

2. Классификация локаций: разработка и обучение классификаторов для определения следующих локаций на основе показателей текущего состояния процесса или активности (предполагаемого времени выполнения текущего этапа, значений категориальных признаков, отражающих важные свойства выполнения и др.). Это может повысить точность предсказаний.

3. Кодирование конструкций управления потоком: внедрение методов кодирования информации о высокоуровневых конструкциях управления потоком (параллелизм, циклы и т.д.) в текущее выполнение процесса. Это позволит лучше учитывать структуру процесса при предсказаниях.

4. Локальные процессные модели: использование методов локального моделирования процессов для извлечения часто встречающихся паттернов управления потоком из журналов событий. Эти паттерны можно применять для обогащения данных текущих выполнений процесса.

Исследования в области РМ продолжают расширять границы понимания и анализа бизнес-процессов, предлагая новые методы и подходы для обработки и интерпретации событийных данных [30–44]. Две статьи, рассмотренные ниже, предлагают нестандартные подходы к задаче извлечения процессов и к самому понятию модели процесса.

В статье «*Defining Cases and Variants for Object-Centric Event Data*» [30] внимание сосредоточено на анализе событийных данных, связанных с множеством объектов. Традиционные методы РМ ассоциируют каждое событие с одним объектом. Однако такое сжатие размерности может привести к потере ценной информации. Из реальных данных, где часто выполнение процесса связано с множеством объектов (систем, исполнителей и клиентов, средств транспортировки и локаций), теоретически возможно извлечь значительно больше полезных знаний. Авторы предлагают концепцию «исполнений процессов» (*process executions*) – гетерогенную графовую обобщенную форму представления процессов, где активность может быть связана с несколькими объектами сразу, вместо традиционных гомогенных кейсов, где все активности привязаны к одному объекту (рис. 1).

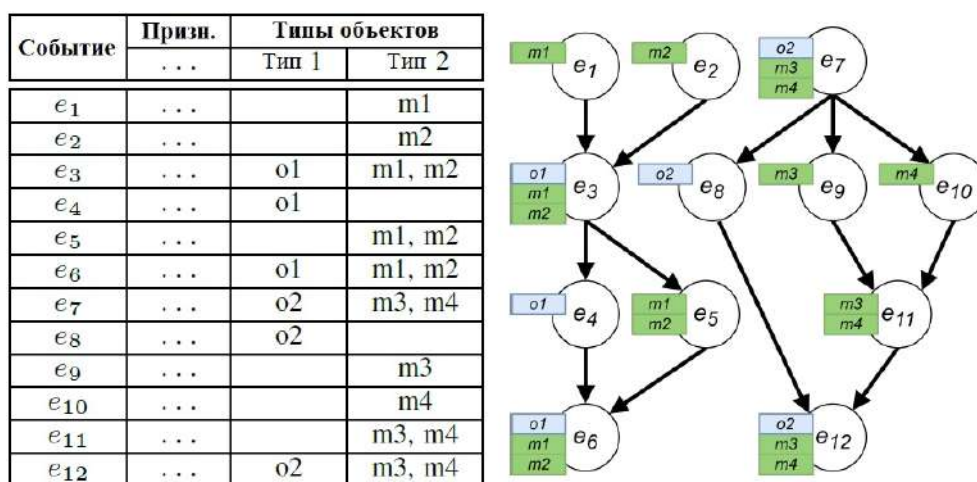


Рис. 1. Объектно-ориентированный журнал событий и соответствующий объектно-ориентированный граф [30]

В этой же работе рассмотрены методы для извлечения «исполнений» из журналов событий и определения эквивалентных «исполнений процессов» с использованием свойств изоморфизма графов. Это позволяет создавать объектоцентричные гиперграфы (рис. 2), которые являются обобщением традиционных графов процессов в РМ. В статье [30] также представлены техники визуализации для разных вариантов этих графов, проведена масштабная оценка их производительности и эффективности.

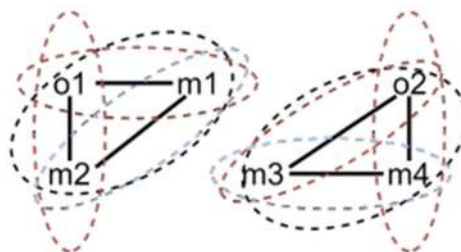


Рис. 2. Пример объектоцентричного гиперграфа, изоморфного графу, показанному на рис. 1

В статье «*High-Level Event Mining: A Framework*» [38] предлагается новый подход к анализу процессов через концепцию высокоуровневых событий. Традиционные методы РМ выполняют анализ процессов на уровне отдельных завершённых путей. Однако не всегда возможно уловить факторы взаимного влияния параллельно текущих кейсов процесса друг на друга. Авторы статьи вводят концепцию высокоуровневых событий, определяя их как события, происходящие близко во времени и разделяющие общие ресурсы процесса. Предложенный фреймворк позволяет обнаруживать и логировать такие высокоуровневые события, создавая специализированный журнал событий. Этот журнал может быть использован для применения существующих методов РМ и получения дополнительных знаний о процессе. Эксперименты, выполненные авторами исследования на симулированных и реальных данных, показывают, что предложенный метод позволяет автоматически обнаруживать системные паттерны, такие как различные состояния трафика, высокие нагрузки и простои.

Из рассмотренных материалов [30–44] особый практический интерес представляют следующие идеи и подходы:

1. Использование гетерогенных графовых структур для представления событийных данных, связанных с несколькими объектами, с целью построения более точных моделей сложных процессов и во избежание потерь информации при «выравнивании» данных.
2. Применение методов извлечения исполнений процессов из объектоцентричных данных для анализа исполнений процессов на основе изоморфизма графов и создания объектоцентричных вариантов.
3. Внедрение техник визуализации для объектоцентричных вариантов для упрощения интерпретации результатов анализа.
4. Разработка фреймворка для автоматического обнаружения высокоуровневых событий на основе временной близости и общих ресурсов процесса.
5. Создание нового типа журнала событий, который будет включать высокоуровневые события с новыми соответствующими атрибутами для применения существующих методов Process Mining к новым данным и получения дополнительных знаний.

6. Использование высокоуровневого журнала событий для анализа системных паттернов поможет в решении вопроса оптимизации процессов и повышения производительности.

Современные исследования в области РМ [45–51] констатируют ценность не только предоставления рекомендаций по улучшению процессов, но и обеспечение их объяснимости. Объяснимый искусственный интеллект – незаменимый фактор, увеличивающий доверие пользователей к рекомендательным системам и повышающий активность их участия в процессе принятия решений. В статье «*Explainable Process Prescriptive Analytics*» [45] предлагается подход, при котором рекомендации сопровождаются объяснениями, основанными на поведении процесса, его характеристиках и контексте выполнения. Сами предложенные методы не относятся к явному решению ни одного из пунктов базовой классификации задач РМ. Однако объяснения будут способствовать внедрению рекомендаций, полученных путем решения задачи улучшения процесса, обеспечивая прозрачность и обоснованность предлагаемых изменений.

Системы рекомендаций, осведомленные о процессах, представляют собой информационные системы, направленные на мониторинг выполнения процессов, предсказание их исходов и формирование рекомендаций по эффективным вмешательствам для достижения оптимальных результатов. Современные публикации описывают системы, возвращающие только практические рекомендации. Однако рекомендации без доступных рациональных объяснений могут привести к тому, что владельцы процессов не поймут, с какой целью должны быть осуществлены эти вмешательства. В результате возникает высокий риск того, что у владельцев процессов не возникнет или будет утрачено доверие к рекомендательной системе, и они просто проигнорируют важные указания. В статье [45] предлагается для объяснения предсказаний и рекомендаций использовать метод ценности Шепли (*Shapley Values*) из теории игр. Значения Шепли помогают определить, какие признаки в поведении процесса больше всего влияют на конкретные рекомендации. В статье показана потенциальная значимость этих объяснений для владельцев процессов на двух примерах использования. Для практического использования здесь интересен целый ряд идей.

Во-первых, выглядит перспективной разработка механизма, который будет обеспечивать сопровождение каждой рекомендации рациональным объяснением причин ее предложения, включая анализ поведения процесса, его внутренних характеристик и контекста выполнения.

Во-вторых, важен учет контекста выполнения процесса при формировании рекомендаций и объяснений, что поможет сделать рекомендации более релевантными и приемлемыми для пользователей.

В-третьих, предсказание ожидаемых положительных сценариев в случае следования рекомендациям позволяет обосновать ценность введения предложенных изменений в систему.

В-четвертых, представляет особую практическую ценность разработка индивидуальных рекомендаций для каждого процесса с учетом его специфики и текущего состояния.

Обсуждение и результаты

Результаты выполненного обзора можно обобщить, сопоставив между собой группы задач аналитики процессов, методы их решения и рекомендации по их практическому применению (табл. 1). При этом можно видеть, что

зачастую одни и те же инструментальные методы хорошо подходят для решения сразу нескольких групп задач.

Таблица 1

Задачи аналитики организационных процессов и методы их решения

Аналитические задачи	Методы решения	Источники	Рекомендации по практическому применению
1	2	3	4
Извлечение процессов	Метод количественной оценки качества стохастических моделей	[1–7]	Для учета неопределенности и вариативности бизнес-процессов; для управления рисками и поиска компромиссов
	Метод выравнивания путей	[8–15]	Для сложных и динамичных систем, для крупных моделей и журналов событий с большими объемами данных
	Методы локального моделирования бизнес-процессов	[23–29]	Для извлечения часто встречающихся паттернов управления потоком из журналов событий
Анализ соответствия	Метод выравнивания путей	[8–15]	Для сопоставления путей эталонного и реального процессов
Оптимизация процессов	Метод количественной оценки качества стохастических моделей	[1–7]	Для оптимизации процессов и нахождения узких мест
	Анализ бизнес-процессов через концепцию высокоуровневых событий	[38–44]	Для построения более точных моделей сложных процессов и во избежание потерь информации
	Способы рекомендательного сопровождения бизнес-процессов	[45–51]	Для обеспечения прозрачности и обоснованности предлагаемых изменений
Мониторинг и контроль	Метод выравнивания путей	[8–15]	Для непрерывного использования при мониторинге
	Методы извлечения исполнений бизнес-процессов из объектоцентричных данных	[30–37]	Для анализа исполнений процессов на основе изоморфизма графов и создания объектоцентричных вариантов
	Гетерогенная графовая обобщенная форма представления бизнес-процессов	[30–37]	Для представления событийных данных, связанных с несколькими объектами

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Предсказание и прогнозирование	Вероятностный метод предсказания локации	[16–22]	Для получения более общего представления о будущем ходе выполнения процесса
	Метод предсказания исхода бизнес-процессов на основе текущих данных о его выполнении	[23–29]	Для повышения точности предсказаний
	Методы кодирования информации о высокоуровневых конструкциях управления потоком	[23–29]	Позволит лучше учитывать структуру бизнес-процессов при предсказаниях

Однако рассмотренные и применяемые сегодня методы оставляют пространство для развития и усовершенствования аналитических инструментов. Так, предложенный в статье «*Context-Aware Trace Alignment with Automated Planning*» [8] метод можно улучшить применением гибридного метода, учитывающего не только контекст, но и высокоуровневые события [38], перенеся алгоритмы детерминированного планирования и модель отклонений с конечных автоматов на гетерогенные графы.

В статье «*High-Level Control-Flow Construct Information for Process Outcome Prediction*» [23] подробно рассматривается и сравнивается множество видов векторизации информации о процессах. Однако для предсказания исхода процесса применяется обычная двухслойная модель *LSTM*, несмотря на то, что известно о существовании механизмов внимания *attention* и *self-attention*. Авторы работы даже приводят ссылки на эти механизмы, но не раскрывают пути их применения для решения задач предсказания, поэтому при реальном применении метода из статьи [23] рационально использовать не только оптимальный способ векторизации, но и наиболее современную нейросетевую архитектуру на последующих слоях, т.е. с применением механизма внимания.

Заключение

Для развития функциональности собственных инструментов анализа бизнес-процессов можно использовать идеи и подходы из представленных исследований. Применение рассмотренных методов позволит существенно улучшить точность предсказания результативности организационных процессов, что поможет пользователям принимать более обоснованные управленческие решения на основе анализа данных.

Интеграция рассмотренных подходов в единый комплексный инструмент анализа БП может существенно повысить его точность, эффективность и пригодность для различных сценариев использования, снизит компетентностный порог входа для аналитиков. Эти инновации помогут пользователям лучше понимать и оптимизировать свои БП, что является ключевым фактором успеха в современном деловом мире.

Применение Process Mining имеет огромный потенциал как в государственном секторе, так и в частном бизнесе, где требуется постоянное повышение эффективности операционной деятельности. Анализ больших объемов

данных о процессах позволяет выявлять неэффективные шаги, предотвращать задержки и ошибки, а также оптимизировать расход ресурсов.

В качестве наглядного примера можно привести отечественную разработку – систему интеллектуального анализа процессов оказания государственных услуг «Нерв», используемую в работе Департамента информационных технологий города Москвы [52]. Внедрение инструмента в работу отдела обеспечило следующие возможности:

- визуализировать поэтапную модель бизнес-процесса в виде ориентированного графа;
- предоставить быстрый доступ к статистике как по отдельным этапам, так и по услуге целиком;
- находить узкие места процесса и рассматривать их на примере конкретных случаев оказания услуг;
- выявлять отклонения от нормы, тренды и закономерности в оказании государственных услуг, организовать мониторинг аномалий.

Система «Нерв» и подобные ей проекты могут служить отличным примером успешного отечественного применения инновационно-технологического подхода к управлению бизнес-процессами на государственном уровне.

Список литературы

1. Burke A., Leemans S., Wynn M. [et al.]. Stochastic Process Model-Log Quality Dimensions: An Experimental Study // 4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/366299159_Stochastic_Process_Model-Log_Quality_Dimensions_An_Experimental_Study (дата обращения: 01.04.2024).
2. Aalst W. Process Mining: Data Science in action – Springer-Verlag. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/312596129_Process_Mining_Data_Science_in_Action (дата обращения: 01.03.2024).
3. Leemans S., Polyvyanyu A. Stochastic-aware conformance checking: an entropy-based approach // Advanced Information Systems Engineering. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/341834929_Stochastic-Aware_Conformance_Checking_An_Entropy-Based_Approach (дата обращения: 01.04.2024).
4. Leemans S., Aalst W., Brockhoff T., Polyvyanyu A. Stochastic process mining: Earth movers' stochastic conformance // 14th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS). 2021. URL: <https://leemans.ch/publications/papers/is2021leemans.pdf> (дата обращения: 01.04.2024).
5. Burke A., Leemans S., Wynn M. Stochastic process discovery by weight estimation // Process mining workshops. 2021. URL: https://www.academia.edu/68356760/Stochastic_Process_Discovery_by_Weight_Estimation (дата обращения: 02.04.2024).
6. Camargo M., Dumas M., Gonzalez-Rojas O. Automated discovery of business process simulation models from event logs // Decision Support Systems. 2020. URL: https://www.academia.edu/68356760/Stochastic_Process_Discovery_by_Weight_Estimation (дата обращения: 02.04.2024).
7. Maggi F., Montali M., Penaloz R. Probabilistic conformance checking based on declarative process models // Advanced Information Systems Engineering. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/343930294_Probabilistic_Conformance_Checking_Based_on_Declarative_Process_Models (дата обращения: 04.04.2024).
8. Acitelli G., Angelini M., Bonomi S. [et al.]. Context-Aware Trace Alignment with Automated Planning // 4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/366277607_Context-Aware_Trace_Alignment_with_Automated_Planning (дата обращения: 10.04.2024).
9. Padro L., Carmona J. Computation of alignments of business processes through relaxation labeling and local optimal search // 15th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/347671760_

- Computation_of_alignments_of_business_processes_through_relaxation_labeling_and_local_optimal_search (дата обращения: 10.04.2024).
10. Guzzo A., Rullo A., Vocaturo E. Process mining applications in the healthcare domain: A comprehensive review // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and knowledge discovery. 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/357379304_Process_mining_applications_in_the_healthcare_domain_A_comprehensive_review (дата обращения: 10.04.2024).
11. Boltenhagen M., Chatain T., Carmona J. A discounted cost function for fast alignments of business processes // Business process management forum (BPM). 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/354167146_A_Discounted_Cost_Function_for_Fast_Alignments_of_Business_Processes (дата обращения: 10.04.2024).
12. Reibner D., A-Cervantes A., Conforti R. [et al.]. Scalable alignments of process models and event logs: An approach based on automata and s-components // 13th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/341588845_Scalable_alignment_of_process_models_and_event_logs_An_approach_based_on_automata_and_S-components (дата обращения: 10.04.2024).
13. Taymouri F., Carmona J. Computing alignments of well-formed process models using local search // ACM TOSEM. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/341807048_Computing_Alignments_of_Well-Formed_Process_Models_using_Local_Search (дата обращения: 10.04.2024).
14. Bloemen V., Zelst S., Aalst W. [et al.]. Aligning observed and modeled behaviour by maximizing synchronous moves and using milestones // 15th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/357933182_Aligning_Observed_and_Modelled_Behaviour_by_Maximizing_Synchronous_Moves_and_Using_Milestones (дата обращения: 01.03.2024).
15. Shinde N., Kulkarni P. Cyber incident response and planning: a flexible approach // Computer Fraud & Security. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/348600750_Cyber_incident_response_and_planning_a_flexible_approach (дата обращения: 10.04.2024).
16. Chiorrini A., Diamantini C., Genga L. [et al.]. Towards next-location prediction for process executions // 4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/366301186_Towards_next-location_prediction_for_process_executions (дата обращения: 10.04.2024).
17. Chiorini A., Diamantini C., Genga L. [et al.]. Embedding process structure in activities for process mapping and comparison (under publication) // New trends in database and information systems (ADBIS). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/363060805_Embedding_Process_Structure_in_Activities_for_Process_Mapping_and_Comparison (дата обращения: 10.04.2024).
18. Pasquadisbiscegli V., Appice A., Gastellano G. [et al.]. Predictive process mining meets computer vision // Business process management forum (BPM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/344105876_Predictive_Process_Mining_Meets_Computer_Vision (дата обращения: 01.03.2024).
19. Taymouri F., Rosa M., Erfani S. [et al.]. Predictive business process monitoring via generative adversarial nets: The case of next event prediction // Business process management forum (BPM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340173139_Predictive_Business_Process_Monitoring_via_Generative_Adversarial_Nets_The_Case_of_Next_Event_Prediction (дата обращения: 10.04.2024).
20. Chiorini A., Diamantini C., Mircoli A. [et al.]. A preliminary study on the application of reinforcement learning for predictive process monitoring // 2nd Int. Conf. on process mining (ICPM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/350509303_A_Preliminary_Study_on_the_Application_of_Reinforcement_Learning_for_Predictive_Process_Monitoring (дата обращения: 10.04.2024).
21. Chiorini A., Diamantini C., Mircoli A. [et al.]. Exploiting instance graphs and graph neural networks for next activity prediction // Process mining workshops. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/359431032_Exploiting_Instance_Graphs_and_Graph_Neural_Networks_for_Next_Activity_Prediction (дата обращения: 10.04.2024).

22. Venugopal I., Tollich J., Fairban M. [et al.]. A comparison of deep learning methods for analyzing and predicting business processes // Int. Conf. on neural networks (IJCNN). 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/354721263_A_Comparison_of_Deep-Learning_Methods_for_Analysing_and_Predicting_Business_Processes (дата обращения: 29.03.2024).
23. Vazifehdoostirani M., Genga L., Dijkman R. Encoding high-level control-flow construct information for process outcome prediction // 4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/366306712_Encoding_High-Level_Control-Flow_Construct_Information_for_Process_Outcome_Prediction (дата обращения: 10.04.2024).
24. Sani M., Vazifehdoostirani M., Park G. [et al.]. Event log sampling for predictive monitoring // Lecture notes in business information processing. 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/359428576_Event_Log_Sampling_for_Predictive_Monitoring (дата обращения: 10.04.2024).
25. Rama-Maneiro E., Vidal J., Lama M. Deep learning for predictive business process monitoring: review and benchmark // Journal IEEE Transactions on Services Computing. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/344410929_Deep_Learning_for_Predictive_Business_Process_Monitoring_Review_and_Benchmark (дата обращения: 10.04.2024).
26. Harane N., Rath S. Comprehensive survey on deep learning approaches in predictive business process monitoring. Springer international publishing, 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/339020687_Comprehensive_Survey_on_Deep_Learning_Approaches_in_Predictive_Business_Process_Monitoring (дата обращения: 10.04.2024).
27. Philipp P., Jacob R, Robert S. [et al.]. Predictive analysis of business processes using neural networks with attention mechanism // Int. Conf. Artificial Intelligence in Information and Communications (ICAIC). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/339390958_Predictive_Analysis_of_Business_Processes_Using_Neural_Networks_with_Attention_Mechanism (дата обращения: 10.04.2024).
28. Pijnenborg P., Verhoeven R., Firat M. [et al.]. Towards evidence-based analysis of palliative treatments for stomach and esophageal cancer patients: a process mining approach // 3rd Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355794000_Towards_Evidence-Based_Analysis_of_Palliative_Treatments_for_Stomach_and_Esophageal_Cancer_Patients_a_Process_Mining_Approach (дата обращения: 10.04.2024).
29. Kim J., Comuzzi M., Dumas M. [et al.]. Encoding resource experience for predictive process monitoring // Desision Support Systems. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355135726_Encoding_resource_experience_for_predictive_process_monitoring (дата обращения: 29.03.2024).
30. Adams J., Schuste D., Schmitz S. [et al.]. Defining Cases and Variants for Object-Centric Event Data // 4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/362544619_Defining_Cases_and_Variants_for_Object-Centric_Event_Data (дата обращения: 27.04.2024).
31. Schuster D., Zelst S., Aalst W. Cortado – an interactive tool for data-driven process discovery and modeling // Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. 42nd Int. Conf., PETRI NETS. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/352417001_Cortado-An_Interactive_Tool_for_Data-Driven_Process_Discovery_and_Modeling (дата обращения: 14.04.2024).
32. Aalst W., Berti A. Discovering object-centric Petri nets // Process and Data Science (PADS). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/344486150_Discovering_Object-Centric_Petri_Nets (дата обращения: 14.03.2024).
33. Adams J., Aalst W. Precision and fitness in object-centric process mining // 3rd Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355794109_Precision_and_Fitness_in_Object-Centric_Process_Mining (дата обращения: 16.03.2024).

34. Galanti R., Leoni M., Navarin N. [et al.]. Object-centric process predictive analytics // CoRR. 2022. Vol. abs/2203.02801. URL: https://www.researchgate.net/publication/359080166_Object-centric_Process_Predictive_Analytics (дата обращения: 18.03.2024).
35. Park G., Adams J., Aalst W. OPerA: Object-centric performance analysis // CoRR. 2022. Vol. abs/2204.10662. URL: https://www.researchgate.net/publication/360164846_OPerA_Object-Centric_Performance_Analysis (дата обращения: 07.03.2024).
36. Adams J., Aalst W. Осп: Object-centric process insights // Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. 43rd Int. Conf., PETRI NETS. 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/361252716_OCp_Object-Centric_Process_Insights (дата обращения: 08.03.2024).
37. Schuh G., Gutzlaff A., Cremer S. [et al.]. A data model to apply process mining in end-to-end order processing processes of manufacturing companies // Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/348480160_A_Data_Model_to_Apply_Process_Mining_in_End-to-End_Order_Processing_Processes_of_Manufacturing_Companies (дата обращения: 18.03.2024).
38. Bakullari B., Aalst W. High-Level Event Mining: A Framework // 4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/364988221_High-Level_Event_Mining_A_Framework (дата обращения: 02.05.2024).
39. Denisov V., Fahland D., Aalst W. Unbiased, fine grained description of processes performance from event data // Business process management forum (BPM). 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/326945011_Unbiased_Fine-Grained_Description_of_Processes_Performance_from_Event_Data_16th_International_Conference_BPM_2018_Sydney_NSW_Australia_September_9-14_2018_Proceedings (дата обращения: 04.05.2024).
40. Toosinezhad Z., Fahland D., Koroglu O. [et al.]. Detecting system-level behavior leading to dynamic bottlenecks // 2th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/346374654_Detecting_System-Level_Behavior_Leading_To_Dynamic_Bottlenecks (дата обращения: 14.05.2024).
41. Wimbauer A., Richter F., Seidl T. Perrcas: process error cascade mining in trace streams // 3th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/359432632_PErrCas_Process_Error_Cascade_Mining_in_Trace_Streams (дата обращения: 10.05.2024).
42. Zelst S., Mannhardt F., Leoni V. [et al.]. Event abstraction in process mining: literature review and taxonomy // Journal Granular Computing. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340966062_Event_Abstraction_in_Process_Mining_-_Literature_Review_and_Taxonomy (дата обращения: 10.05.2024).
43. Pourbafrani M., Aalst W. Extracting process features from event logs to learn coarse-grained simulation models // Advanced Information Systems Engineering. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/352688616_Extracting_Process_Features_from_Event_Logs_to_Learn_Coarse-Grained_Simulation_Models (дата обращения: 12.05.2024).
44. Klijn E., Fahland D. Performance mining for batch processing using the performance spectrum // Business process management forum (BPM). 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/338349257_Performance_Mining_for_Batch_Processing_Using_the_Performance_Spectrum (дата обращения: 27.05.2024).
45. Padella A., Leoni M., Dogan O. [et al.]. Explainable Process Prescriptive Analytics // 4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/366299255_Explainable_Process_Prescriptive_Analytics (дата обращения: 09.05.2024).
46. Dees M., Leoni M., Aalst W. [et al.]. What in process predictions are not followed by good recommendations? // Industry Forum at Business process management (BPM). 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/333393805_What_if_Process_Predictions_are_notfollowed_by_Good_Recommendations (дата обращения: 15.05.2024).

47. Leoni M., Dees M., Reulink L. Design and evaluation of a process-aware recommender system based on prescriptive analytics // 2nd Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/346375281_Design_and_Evaluation_of_a_Process-aware_Recommender_System_based_on_Prescriptive_Analytics (дата обращения: 19.05.2024).
48. Metzger A., Kley T., Palm A. Triggering proactive business process adaptation via online reinforcement learning // 18th Int. Conf. on Business Process Management (BPM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/342123169_Triggering_Proactive_Business_Process_Adaptations_via_Online_Reinforcement_Learning (дата обращения: 17.05.2024).
49. Bozorgi Z., Teinmaa I., Dumas M. [et al.]. Prescriptive process monitoring for cost-aware cycle time reduction // 3rd Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355794100_Prescriptive_Process_Monitoring_for_Cost-Aware_Cycle_Time_Reduction (дата обращения: 17.05.2024).
50. Galanti R., Coma-Puig B., Leoni M. [et al.]. Explianable predictive process monitoring // 2nd Int. Conf. on Process Mining (ICPM). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/343470853_Explianable_Predictive_Process_Monitoring (дата обращения: 11.05.2024).
51. Huang T., Metzger A., Pohl K. Counterfactual explanation for predictive business process monitoring // 18th European, Mediterranean and Middle Eastern Conf. on Information Systems (EMCIS). 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/358848242_Counterfactual_Explinations_for_Predictive_Business_Process_Monitoring (дата обращения: 21.05.2024).
52. Кревский М. И. «НЕРВ» – система интеллектуального анализа процессов оказания государственных услуг // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. по материалам XXI Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2022. С. 79–83.

References

1. Burke A., Leemans S., Wynn M. et al. Stochastic Process Model-Log Quality Dimensions: An Experimental Study. *4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/366299159_Stochastic_Process_Model-Log_Quality_Dimensions_An_Experimental_Study (accessed 01.04.2024).
2. Aalst W. *Process Mining: Data Science in action*. Springer-Verlag, 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/312596129_Process_Mining_Data_Science_in_Action (accessed 01.03.2024).
3. Leemans S., Polyvyanyy A. Stochastic-aware conformance checking: an entropy-based approach. *Advanced Information Systems Engineering*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/341834929_Stochastic-Aware_Conformance_Checking_An_Entropy-Based_Approach (accessed 01.04.2024).
4. Leemans S., Aalst W., Brockhoff T., Polyvyanyy A. Stochastic process mining: Earth movers' stochastic conformance. *14th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS)*. 2021. Available at: <https://leemans.ch/publications/papers/is2021leemans.pdf> (accessed 01.04.2024).
5. Burke A., Leemans S., Wynn M. Stochastic process discovery by weight estimation. *Process mining workshops*. 2021. Available at: https://www.academia.edu/68356760/Stochastic_Process_Discovery_by_Weight_Estimation (accessed 02.04.2024).
6. Camargo M., Dumas M., Gonzalez-Rojas O. Automated discovery of business process simulation models from event logs. *Decision Support Systems*. 2020. Available at: https://www.academia.edu/68356760/Stochastic_Process_Discovery_by_Weight_Estimation (accessed 02.04.2024).
7. Maggi F., Montali M., Renaloz R. Probabilistic conformance checking based on declarative process models. *Advanced Information Systems Engineering*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/343930294_Probabilistic_Conformance_Checking_Based_on_Declarative_Process_Models (accessed 04.04.2024).

8. Acitelli G., Angelini M., Bonomi S. et al. Context-Aware Trace Alignment with Automated Planning. *4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/366277607_Context-Aware_Trace_Alignment_with_Automated_Planning (accessed 10.04.2024).
9. Padro L., Carmona J. Computation of alignments of business processes through relaxation labeling and local optimal search. *15th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/347671760_Computation_of_alignments_of_business_processes_through_relaxation_labeling_and_local_optimal_search (accessed 10.04.2024).
10. Guzzo A., Rullo A., Vocaturo E. Process mining applications in the healthcare domain: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and knowledge discovery*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/357379304_Process_mining_applications_in_the_healthcare_domain_A_comprehensive_review (accessed 10.04.2024).
11. Boltenhagen M., Chatain T., Carmona J. A discounted cost function for fast alignments of business processes. *Business process management forum (BPM)*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/354167146_A_Discounted_Cost_Function_for_Fast_Alignments_of_Business_Processes (accessed 10.04.2024).
12. Reibner D., A-Cervantes A., Conforti R. et al. Scalable alignments of process models and event logs: An approach based on automata and s-components. *13th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/341588845_Scalable_alignment_of_process_models_and_event_logs_An_approach_based_on_automata_and_S-components (accessed 10.04.2024).
13. Taymouri F., Carmona J. Computing alignments of well-formed process models using local search. *ACM TOSEM*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/341807048_Computing_Alignments_of_Well-Formed_Process_Models_using_Local_Search (accessed 10.04.2024).
14. Bloemen V., Zelst S., Aalst W. et al. Aligning observed and modeled behaviour by maximizing synchronous moves and using milestones. *15th Int. Conf. «Information Systems» (IADIS)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/357933182_Aligning_Observed_and_Modelled_Behaviour_by_Maximizing_Synchronous_Moves_and_Using_Milestones (accessed 01.03.2024).
15. Shinde N., Kulkarni P. Cyber incident response and planning: a flexible approach. *Computer Fraud & Security*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348600750_Cyber_incident_response_and_planning_a_flexible_approach (accessed 10.04.2024).
16. Chiorrini A., Diamantini C., Genga L. et al. Towards next-location prediction for process executions. *4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/366301186_Towards_next-location_prediction_for_process_executions (accessed 10.04.2024).
17. Chiorini A., Diamantini C., Genga L. et al. Embedding process structure in activities for process mapping and comparison (under publication). *New trends in database and information systems (ADBIS)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/363060805_Embedding_Process_Structure_in_Activities_for_Process_Mapping_and_Comparison (accessed 10.04.2024).
18. Pasquadibiscegli V., Appice A., Gastellano G. et al. Predictive process mining meets computer vision. *Business process management forum (BPM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344105876_Predictive_Process_Mining_Meets_Computer_Vision (accessed 01.03.2024).
19. Taymouri F., Rosa M., Erfani S. et al. Predictive business process monitoring via generative adversarial nets: The case of next event prediction. *Business process management forum (BPM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/340173139_Predictive_Business_Process_Monitoring_via_Generative_Adversarial_Nets_The_Case_of_Next_Event_Prediction (accessed 10.04.2024).
20. Chiorini A., Diamantini C., Mircoli A. et al. A preliminary study on the application of reinforcement learning for predictive process monitoring. *2nd Int. Conf. on process*

- mining (ICPM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/350509303_A_Preliminary_Study_on_the_Application_of_Reinforcement_Learning_for_Predictive_Process_Monitoring (accessed 10.04.2024).
21. Chiorini A., Diamantini C., Mircoli A. et al. Exploiting instance graphs and graph neural networks for next activity prediction. *Process mining workshops*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/359431032_Exploiting_Instance_Graphs_and_Graph_Neural_Networks_for_Next_Activity_Prediction (accessed 10.04.2024).
22. Venugopal I., Tollich J., Fairban M. et al. A comparison of deep learning methods for analyzing and predicting business processes. *Int. Conf. on neural networks (IJCNN)*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/354721263_A_Comparison_of_Deep-Learning_Methods_for_Analysing_and_Predicting_Business_Processes (accessed 29.03.2024).
23. Vazifehdoostirani M., Genga L., Dijkman R. Encoding high-level control-flow construct information for process outcome prediction. *4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/366306712_Encoding_High-Level_Control-Flow_Construct_Information_for_Process_Outcome_Prediction (accessed 10.04.2024).
24. Sani M., Vazifehdoostirani M., Park G. et al. Event log sampling for predictive monitoring. *Lecture notes in business information processing*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/359428576_Event_Log_Sampling_for_Predictive_Monitoring (accessed 10.04.2024).
25. Rama-Maneiro E., Vidal J., Lama M. Deep learning for predictive business process monitoring: review and benchmark. *Journal IEEE Transactions on Services Computing*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344410929_Deep_Learning_for_Predictive_Business_Process_Monitoring_Review_and_Benchmark (accessed 10.04.2024).
26. Harane N., Rath S. *Comprehensive survey on deep learning approaches in predictive business process monitoring*. Springer international publishing, 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/339020687_Comprehensive_Survey_on_Deep_Learning_Approaches_in_Predictive_Business_Process_Monitoring (accessed 10.04.2024).
27. Philipp P., Jacob R, Robert S. et al. Predictive analysis of business processes using neural networks with attention mechanism. *Int. Conf. Artificial Intelligence in Information and Communications (ICAIIIC)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/339390958_Predictive_Analysis_of_Business_Processes_Using_Neural_Networks_with_Attention_Mechanism (accessed 10.04.2024).
28. Pijnenborg P., Verhoeven R., Firat M. et al. Towards evidence-based analysis of palliative treatments for stomach and esophageal cancer patients: a process mining approach. *3rd Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/355794000_Towards_Evidence-Based_Analysis_of_Palliative_Treatments_for_Stomach_and_Esophageal_Cancer_Patients_a_Process_Mining_Approach (accessed 10.04.2024).
29. Kim J., Comuzzi M., Dumas M. et al. Encoding resource experience for predictive process monitoring. *Desision Support Systems*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/355135726_Encoding_resource_experience_for_predictive_process_monitoring (accessed 29.03.2024).
30. Adams J., Schuste D., Schmitz S. et al. Defining Cases and Variants for Object-Centric Event Data. *4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/362544619_Defining_Cases_and_Variants_for_Object-Centric_Event_Data (accessed 27.04.2024).
31. Schuster D., Zelst S., Aalst W. Cortado – an interactive tool for data-driven process discovery and modeling. *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. 42nd Int. Conf., PETRI NETS*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/352417001_Cortado-An_Interactive_Tool_for_Data-Driven_Process_Discovery_and_Modeling (accessed 14.04.2024).

32. Aalst W., Berti A. Discovering object-centric Petri nets. *Process and Data Science (PADS)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344486150_Discovering_Object-Centric_Petri_Nets (accessed 14.03.2024).
33. Adams J., Aalst W. Precision and fitness in object-centric process mining. *3rd Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/355794109_Precision_and_Fitness_in_Object-Centric_Process_Mining (accessed 16.03.2024).
34. Galanti R., Leoni M., Navarin N. et al. Object-centric process predictive analytics. *CoRR*. 2022;abs/2203.02801. Available at: https://www.researchgate.net/publication/359080166_Object-centric_Process_Predictive_Analytics (accessed 18.03.2024).
35. Park G., Adams J., Aalst W. OPerA: Object-centric performance analysis. *CoRR*. 2022;abs/2204.10662. Available at: https://www.researchgate.net/publication/360164846_OPerA_Object-Centric_Performance_Analysis (accessed 07.03.2024).
36. Adams J., Aalst W. Ocπ: Object-centric process insights. *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. 43rd Int. Conf., PETRI NETS*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/361252716_OCp_Object-Centric_Process_Insights (accessed 08.03.2024).
37. Schuh G., Gutzlaff A., Cremer S. et al. A data model to apply process mining in end-to-end order processing processes of manufacturing companies. *Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348480160_A_Data_Model_to_Apply_Process_Mining_in_End-to-End_Order_Processing_Processes_of_Manufacturing_Companies (accessed 18.03.2024).
38. Bakullari B., Aalst W. High-Level Event Mining: A Framework. *4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/364988221_High-Level_Event_Mining_A_Framework (accessed 02.05.2024).
39. Denisov V., Fahland D., Aalst W. Unbiased, fine grained description of processes performance from event data. *Business process management forum (BPM)*. 2018. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326945011_Unbiased_Fine-Grained_Description_of_Processes_Performance_from_Event_Data_16th_International_Conference_BPM_2018_Sydney_NSW_Australia_September_9-14_2018_Proceedings (accessed 04.05.2024).
40. Toosinezhad Z., Fahland D., Koroglu O. et al. Detecting system-level behavior leading to dynamic bottlenecks. *2th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/346374654_Detecting_System-Level_Behavior_Leading_To_Dynamic_Bottlenecks (accessed 14.05.2024).
41. Wimbauer A., Richter F., Seidl T. Perrcas: process error cascade mining in trace streams. *3th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/359432632_PErrCas_Process_Error_Cascade_Mining_in_Trace_Streams (accessed 10.05.2024).
42. Zelst S., Mannhardt F., Leoni V. et al. Event abstraction in process mining: literature review and taxonomy. *Journal Granular Computing*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/340966062_Event_Abstraction_in_Process_Mining_-_Literature_Review_and_Taxonomy (accessed 10.05.2024).
43. Pourbafrani M., Aalst W. Extracting process features from event logs to learn coarse-grained simulation models. *Advanced Information Systems Engineering*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/352688616_Extracting_Process_Features_from_Event_Logs_to_Learn_Coarse-Grained_Simulation_Models (accessed 12.05.2024).
44. Klijn E., Fahland D. Performance mining for batch processing using the performance spectrum. *Business process management forum (BPM)*. 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/338349257_Performance_Mining_for_Batch_Processing_Using_the_Performance_Spectrum (accessed 27.05.2024).
45. Padella A., Leoni M., Dogan O. et al. Explainable Process Prescriptive Analytics. *4th Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/366299255_Explainable_Process_Prescriptive_Analytics (accessed 09.05.2024).

46. Dees M., Leoni M., Aalst W. et al. What in process predictions are not followed by good recommendations? *Industry Forum at Business process management (BPM)*. 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/333393805_What_if_Process_Predictions_are_notfollowed_by_Good_Recommendations (accessed 15.05.2024).
47. Leoni M., Dees M., Reulink L. Design and evaluation of a process-aware recommender system based on prescriptive analytics. *2nd Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/346375281_Design_and_Evaluation_of_a_Process-aware_Recommender_System_based_on_Prescriptive_Analytics (accessed 19.05.2024).
48. Metzger A., Kley T., Palm A. Triggering proactive business process adaptation via online reinforcement learning. *18th Int. Conf. on Business Process Management (BPM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/342123169_Triggering_Proactive_Business_Process_Adaptations_via_Online_Reinforcement_Learning (accessed 17.05.2024).
49. Bozorgi Z., Teinemaa I., Dumas M. et al. Prescriptive process monitoring for cost-aware cycle time reduction. *3rd Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/355794100_Prescriptive_Process_Monitoring_for_Cost-Aware_Cycle_Time_Reduction (accessed 17.05.2024).
50. Galanti R., Coma-Puig B., Leoni M. et al. Explainable predictive process monitoring. *2nd Int. Conf. on Process Mining (ICPM)*. 2020. Available at: https://www.researchgate.net/publication/343470853_Explainable_Predictive_Process_Monitoring (accessed 11.05.2024).
51. Huang T., Metzger A., Pohl K. Counterfactual explanation for predictive business process monitoring. *18th European, Mediterranean and Middle Eastern Conf. on Information Systems (EMCIS)*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/358848242_Counterfactual_Explanations_for_Predictive_Business_Process_Monitoring (accessed 21.05.2024).
52. Krevskiy M. I. "NERVE" – a system of intellectual analysis of the processes of rendering public services. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike : sb. st. po materialam XXI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of informatics in education, management, economics and technology : collection of articles based on the materials of the XXI International Scientific and Technical Conference. conf.* . Penza, 2022:79–83. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Игоревич Кревский

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: westhemer1@gmail.com

Mikhail I. Krevskiy

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Сергеевич Бождай

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

Aleksandr S. Bozhday

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

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

Поступила в редакцию/Received 24.05.2024

Поступила после рецензирования/Revised 05.11.2024

Принята к публикации/Accepted 17.12.2024

ЗАДАЧА ДИФРАКЦИИ ТЕ-ВОЛНЫ НА ДВУМЕРНОМ СЛОЕ, ПОКРЫТОМ ГРАФЕНОМ, С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ

С. В. Тихов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
tik.stanislav2015@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Поднимается проблема изучения оптических свойств графена с учетом присущей данному материалу оптической нелинейности и влияния окружающей среды. Целями работы являются исследование задачи дифракции ТЕ-поляризованной волны на двумерном слое, покрытом графеном, и разработка эффективного численного метода решения этой задачи. *Материалы и методы.* С использованием метода функций Грина задача дифракции сводится к граничному гиперсингулярному интегральному уравнению, для решения которого применяется метод коллокаций, дополненный итерационным методом для учета нелинейности графена. *Результаты.* Построен метод исследования оптических свойств графена или любого другого двумерного материала, свойства которого описываются (возможно, нелинейной) поверхностной проводимостью, учитывающий как внутреннюю оптическую нелинейность графена, так и влияние окружающей среды. *Выводы.* Главным достоинством разработанного метода является то, что его применение не требует наложения каких-либо ограничений на параметры задачи, в том числе частоту падающей электромагнитной волны, а также допускает произвол в задании проводимости двумерного покрытия, что открывает широкие возможности для исследования смежных задач.

Ключевые слова: электромагнитные волны, графен, нелинейность, задача дифракции, интегральные уравнения

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-11-20087).

Для цитирования: Тихов С. В. Задача дифракции ТЕ-волны на двумерном слое, покрытом графеном, с учетом нелинейности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 73–85. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-6

SCATTERING PROBLEM OF TE-WAVE ON A TWO-DIMENSIONAL LAYER, COVERED WITH GRAPHENE, ACCOUNTING FOR THE NONLINEARITY

S.V. Tikhov

Penza State University, Penza, Russia
tik.stanislav2015@yandex.ru

Abstract. *Background.* This paper focuses on the study of optical properties of graphene accounting for the intrinsic optical nonlinearity of this material as well as the effects of the

surrounding media. The paper aims to consider a diffraction problem of an electromagnetic wave on a two-dimensional slab covered with graphene, and to develop an effective numerical method for solving this problem. *Materials and methods.* Using Green's functions approach, the diffraction problem is reduced to a boundary hypersingular integral equation for solving which we apply the collocation method together with an iterative one in order to account for the nonlinearity of graphene. *Results.* We constructed the method of studying the optical properties of graphene or any other two-dimensional material whose properties are described by (probably, nonlinear) surface conductivity, accounting for the intrinsic nonlinearity of graphene as well as the effects of the surrounding environment. *Conclusions.* The main advantage of the developed method is the fact that it is applicable with no restrictions on the parameters of the problem, in particular a frequency of an incident electromagnetic wave, and allows for arbitrary expressions for the conductivity of two-dimensional covering, which opens up new opportunities for studying related problems.

Keywords: electromagnetic waves, graphene, nonlinearity, scattering problem, integral equations

Financing: the work was carried out with the support of the Russian Science Foundation (project № 20-11-20087).

For citation: Tikhov S.V. Scattering problem of TE-wave on a two-dimensional layer, covered with graphene, accounting for the nonlinearity. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):73–85. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-6

Введение

В настоящее время в России и за рубежом большое внимание уделяется изучению двумерных материалов и двумерных электронных компонентов. Среди них особое место занимает графен, впервые экспериментально полученный в 2004 г. Геймом и Новоселовым [1, 2].

Графен представляет собой двумерный слой атомов углерода, образующих гексагональную решетку. Благодаря своему строению графен обладает рядом уникальных физических свойств, в том числе необычными оптическими свойствами. Во-первых, графен способен поглощать электромагнитное излучение в широком диапазоне частот от видимого света до средне-инфракрасного излучения, причем величиной поглощения в графене можно управлять с помощью легирования или приложения к графену некоторой разности потенциалов, что может быть использовано для разработки широкополосных насыщаемых поглотителей для сверхбыстрых лазеров [3]. Во-вторых, подвижность электронов в графене может достигать очень больших значений, что является перспективным для создания высокоскоростных электрооптических модуляторов и фотоприемников [4]. В-третьих, графеновые фотонные устройства являются перспективными для приложений в биохимическом зондировании, поскольку графен обладает огромной адсорбционной способностью из-за большой удельной поверхности монослоя атомов углерода [5].

При нормальном падении света на слой графена (под прямым углом к поверхности) поглощение электромагнитного излучения составляет около 2,3 %. Хотя для материала толщиной в атомный слой этот показатель представляется весьма внушительным, как правило, на практике такое поглощение недостаточно. Для усиления взаимодействия света и вещества в графеновых фотонных устройствах графен интегрируют с различными фотонными

структурами, такими как плазмонные структуры, оптоволоконные структуры или фотонные интегральные схемы. За последние десять лет появилось множество работ, в которых авторы предлагают разные интегрированные в волноводы графеновые фотонные устройства в качестве эффективных широкополосных поляризаторов [6], насыщаемых поглотителей [7], оптических модуляторов [8] и фотодетекторов [9].

В работах С. А. Михайлова было впервые теоретически предсказано, что графен обладает сильной кубической (оптической) нелинейностью, обусловленной взаимодействием носителей заряда в графене с электромагнитным полем [10, 11]. С тех пор оптическая нелинейность графена очень широко изучалась многими исследователями. Были проведены различные эксперименты с графеном в свободном пространстве и графеном, размещенным на фотонных кристаллах, для исследования различных нелинейных явлений в графене, включая генерацию комбинационных частот, эффекты Керра (или, другими словами, эффекты самовоздействия, не влияющие на частоту электромагнитного излучения), двухфотонное поглощение и др. Оптическая нелинейность графена открывает большие перспективы для создания нового поколения фотонных устройств, использующих нелинейности [12, 13].

Для разработки указанных устройств необходимо полное понимание нелинейного взаимодействия графена с электромагнитным полем. В общем случае оно определяется как внутренней оптической нелинейностью графена, так и влиянием окружающей среды, поскольку, как уже отмечалось ранее, на практике графен интегрируют с фотонными структурами, например, размещают на кремниевой подложке.

Материал и методика

Для численного моделирования оптических свойств графена предлагается рассмотреть задачу дифракции монохроматической ТЕ-поляризованной электромагнитной волны на плоском диэлектрическом слое, покрытом графеном, с учетом оптической нелинейности графена.

Ниже представлена постановка задачи.

Определим множества

$$\Omega_1 := \{(x, z) : x > h, z \in \mathbb{R}\}, \quad \Omega_2 := \{(x, z) : 0 < x < h, z \in \mathbb{R}\},$$

$$\Gamma_0 := \{(x, z) : x = 0, z \in \mathbb{R}\}, \quad \Gamma_h := \{(x, z) : x = h, z \in \mathbb{R}\}.$$

Рассмотрим двумерный бесконечный слой Ω_2 толщиной h , покрытый графеном на границе Γ_h и имеющий идеально проводящую стенку на границе Γ_0 . Области Ω_1 и Ω_2 заполнены изотропными однородными немагнитными средами, которые характеризуются постоянными вещественными диэлектрическими проницаемостями.

На границу Γ_h из полуплоскости Ω_1 падает монохроматическая ТЕ-поляризованная волна $\mathbf{E}^{\text{inc}} \exp(-i\omega t)$, $\mathbf{H}^{\text{inc}} \exp(-i\omega t)$, где $\mathbf{E}^{\text{inc}}, \mathbf{H}^{\text{inc}}$ есть комплексные амплитуды, имеющие вид

$$\mathbf{E}^{\text{inc}} = (0, E_y^{\text{inc}}(x, z), 0), \quad \mathbf{H}^{\text{inc}} = (H_x^{\text{inc}}(x, z), 0, H_z^{\text{inc}}(x, z)).$$

Проходя через границу Γ_h , падающее поле $\mathbf{E}^{\text{inc}}, \mathbf{H}^{\text{inc}}$ частично отражается и частично проходит вглубь Ω_2 . Пусть $(\mathbf{E}^{\text{ref}}, \mathbf{H}^{\text{ref}})\exp(-i\omega t)$ и $(\mathbf{E}^{\text{tm}}, \mathbf{H}^{\text{tm}})\exp(-i\omega t)$ обозначают отраженное и прошедшее поля. Тогда полное поле имеет вид $(\mathbf{E}^{\text{tot}}, \mathbf{H}^{\text{tot}})\exp(-i\omega t)$, где

$$\mathbf{E}^{\text{tot}} = \begin{cases} \mathbf{E}^{\text{ref}} + \mathbf{E}^{\text{inc}}, & (x, z) \in \Omega_1, \\ \mathbf{E}^{\text{tm}}, & (x, z) \in \Omega_2, \end{cases} \quad \mathbf{H}^{\text{tot}} = \begin{cases} \mathbf{H}^{\text{ref}} + \mathbf{H}^{\text{inc}}, & (x, z) \in \Omega_1, \\ \mathbf{H}^{\text{tm}}, & (x, z) \in \Omega_2. \end{cases}$$

Предполагая, что отраженное и прошедшее поля имеют ту же поляризацию, что и падающий свет, имеем

$$\mathbf{E}^{\text{ref}} = (0, E_y^{\text{ref}}(x, z), 0), \quad \mathbf{H}^{\text{ref}} = (H_x^{\text{ref}}(x, z), 0, H_z^{\text{ref}}(x, z)),$$

$$\mathbf{E}^{\text{tm}} = (0, E_y^{\text{tm}}(x, z), 0), \quad \mathbf{H}^{\text{tm}} = (H_x^{\text{tm}}(x, z), 0, H_z^{\text{tm}}(x, z)).$$

Комплексные амплитуды $\mathbf{E}^{\text{tot}}, \mathbf{H}^{\text{tot}}$ удовлетворяют уравнениям Максвелла. Касательная компонента $\mathbf{E}_\tau^{\text{tot}}$ электрического поля обращается в нуль на границе Γ_0 . Наличие графенового покрытия на границе Γ_h обуславливает следующее условие сопряжения:

$$[\mathbf{n}, \mathbf{H}^{\text{tot}}]_{|_{x=h+0}} - [\mathbf{n}, \mathbf{H}^{\text{tot}}]_{|_{x=h-0}} = \sigma_g \mathbf{E}_\tau^{\text{tot}}|_{|_{x=h-0}},$$

где $\mathbf{n} = (1, 0, 0)$ есть единичный вектор нормали, направленный вдоль оси Ox ; $[\cdot]$ – векторное произведение и σ_g – проводимость графена. Предполагаем, что источник поля находится в конечной области, поэтому как отраженное $\mathbf{E}^{\text{ref}}, \mathbf{H}^{\text{ref}}$, так и падающее $\mathbf{E}^{\text{inc}}, \mathbf{H}^{\text{inc}}$ поля удовлетворяют условиям Зоммерфельда в полуплоскости Ω_1 .

Ниже индекс j принимает значения 1, 2. Введем обозначения $u_1(x, z) := E_y^{\text{ref}}(x, z)$, $u_2(x, z) := E_y^{\text{tm}}(x, z)$, $u_{\text{inc}} := E_y^{\text{inc}}(x, z)$.

Описанная задача дифракции эквивалентна краевой задаче, которая состоит в нахождении функций $u_j(x, z) \in C^2(\Omega_j) \cap C(\bar{\Omega}_j)$, удовлетворяющих паре уравнений Гельмгольца

$$\Delta u_j + k_j^2 u_j = 0, \quad (x, z) \in \Omega_j, \quad (1)$$

условию $u_2|_{x=0} = 0$, условию непрерывности на границе Γ_h , т.е.

$$u_1|_{x=h+0} - u_2|_{x=h-0} = -u_{\text{inc}}|_{x=h+0}, \quad (2)$$

условию сопряжения вида

$$\frac{\partial u_1}{\partial x}\bigg|_{x=h+0} - \frac{\partial u_2}{\partial x}\bigg|_{x=h-0} - \gamma \sigma_g u_2|_{x=h-0} = -\frac{\partial u_{\text{inc}}}{\partial x}\bigg|_{x=h+0}, \quad (3)$$

где $\gamma = (ic\epsilon_0)^{-1}$, и условию излучения на бесконечности

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} u_1 = \text{const}, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial u_1}{\partial r} + i k_1 u_1 \right) = 0, \quad r = \sqrt{x^2 + z^2}. \quad (4)$$

В качестве u_{inc} используем фундаментальное решение уравнения Гельмгольца в области Ω_1 , имеющее вид

$$u_{\text{inc}}(x, z) = \frac{Ai}{4} H_0^{(1)} \left(k_1 \sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} \right),$$

где $H_0^{(1)}$ есть функция Ханкеля первого рода; A, x_0, z_0 – вещественные параметры. Ниже будем также использовать обозначения

$$f(z) = u_{\text{inc}}(x, z)|_{x=h+0}, \quad f'(z) = \frac{\partial u_{\text{inc}}(x, z)}{\partial x} \Big|_{x=h+0}.$$

Краевую задачу (1)–(5) можно свести к граничному интегральному уравнению вида

$$(N_2 v)(z) + (N_1 v)(z) - \gamma \sigma_g v(z) = F(z), \quad (5)$$

где $v(z)$ есть след решения $u_2(x, z)$ на границе Γ_h ,

$$(N_j \varphi)(z) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\eta) \frac{\partial G_j(x, z, \xi, \eta)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=h} d\eta \right] \Big|_{x=h},$$

и $F(z) = (N_1 f)(z) - g(z)$. Здесь $G_j \equiv G_j(x, z, \xi, \eta)$ – функция Грина задачи Дирихле для двумерного уравнения Гельмгольца в области Ω_j . Аналитические выражения для G_j представлены, например, в работе [14].

Оба интегральных оператора N_j являются гиперсингулярными. Для вычисления таких интегралов предлагается представить решение $v(z)$ в виде Чебышевского ряда и использовать явные выражения для действия гиперсингулярного интегрального оператора на многочлены Чебышева второго рода [15]. Для этого потребуются провести ряд преобразований уравнения (5) и входящих в него интегральных операторов N_j , а именно необходимо перейти от интегралов по всей числовой прямой к интегралам по отрезку $[-1, 1]$, а также получить $\sqrt{1-t^2}$ в качестве весовой функции.

Введем новые переменные

$$z = \ln \frac{1+\zeta}{1-\zeta}, \quad \eta = \ln \frac{1+p}{1-p}.$$

Представим решение $v(z)$ в виде

$$v(z) = v \left(\ln \frac{1+\zeta}{1-\zeta} \right) = \tilde{v}(\zeta) = \sqrt{1-\zeta^2} \cdot \sum_{n=0}^{+\infty} c_n U_n(\zeta),$$

где U_n есть многочлены Чебышева второго рода, а c_n есть некоторые (искомые) коэффициенты. После выполнения ряда преобразований уравнение (5) примет вид

$$\sum_{n=0}^{+\infty} c_n \left(Y_n(\zeta) - \gamma \sigma_g \sin((n+1) \arccos \zeta) \right) = \tilde{F} \left(\ln \frac{1+\zeta}{1-\zeta} \right), \quad (6)$$

где

$$Y_n(\zeta) = (n+1) \sqrt{1-\zeta^2} \sin((n+1) \arccos \zeta) + \sum_{i=1}^3 K_i^{(n)}(\zeta).$$

Здесь

$$K_i^{(n)}(\zeta) = \int_0^\pi \tilde{K}_i(\zeta, \cos \theta) \frac{\sin(n+1)\theta}{\sin \theta} d\theta,$$

$$\tilde{K}_i(\zeta, p) = -\frac{1}{2\pi} \left(1 - \frac{(1-p\zeta)^2}{(\zeta-p)^2} + \operatorname{arctanh}^2 \frac{\zeta-p}{1-p\zeta} \right),$$

а два других интегральных ядра определяются как

$$\tilde{K}_i(\zeta, p) = K_i \left(\ln \frac{1+\zeta}{1-\zeta}, \ln \frac{1+p}{1-p} \right),$$

где $K_2(z, \eta) = S_1(z, \eta) + S_2(z, \eta)$,

$$S_1(z, \eta) = \frac{1}{h} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{q_n^2 \exp(-\beta_n |z-\eta|)}{\beta_n} - \frac{q_n^2 \exp(-q_n |z-\eta|)}{q_n},$$

$$S_2(z, \eta) = \frac{\pi \exp\left(-\frac{\pi}{h} |z-\eta|\right)}{h^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{\pi}{h} |z-\eta|\right) \right)^2} - \frac{1}{\pi(z-\eta)^2},$$

$$K_3(z, \eta) = \frac{ik_1^2}{2} \left(\frac{H_1^{(1)}(k_1 |z-\eta|)}{k_1 |z-\eta|} + \frac{2i\pi^{-1}}{k_1^2 |z-\eta|^2} \right),$$

и $q_n = \pi n h^{-1}$, $\beta_n = \sqrt{q_n^2 - k_2^2}$.

С учетом присущей графену оптической нелинейности проводимость σ_g в уравнении (6) имеет вид

$$\sigma_g = \sigma^{(1)} + \sigma^{(3)} |\tilde{v}|^2(\zeta), \quad (7)$$

где $\sigma^{(1)}$, $\sigma^{(3)}$ есть некоторые комплексные величины. При подставлении (7) в уравнение (6) последнее становится нелинейным. Для его решения предлагается использовать гибридный подход, основанный на использовании метода коллокации совместно с итерационным методом.

Ниже приведем описание указанного численного метода.

Преположим, что $\sigma^{(3)} = 0$. В этом случае уравнение (6) является линейным и для его решения можно использовать классический метод коллокаций.

Введем сетку

$$-1 < \zeta_0 < \zeta_1 < \dots < \zeta_N < 1$$

с узлами ζ_k , являющимися корнями полинома Чебышева $U_{N+1}(\zeta)$. Будем искать приближенное решение уравнения (6) в виде

$$\tilde{v}_N(\zeta) = \sqrt{1-\zeta^2} \cdot \sum_{n=0}^N c_n U_n(\zeta) \quad (8)$$

с коэффициентами, определяемыми из системы, состоящей из $N+1$ уравнений

$$\sum_{n=0}^N c_n \left[Y_n(\zeta_k) - \gamma \sigma^{(1)} \sin((n+1) \arccos \zeta_k) \right] = \tilde{F}(\zeta_k), \quad (9)$$

которую можно решить при помощи метода Гаусса или какого-либо итерационного метода.

Пусть теперь $\sigma^{(3)}$ отлична от нуля. Ясно, что в формуле (7) слагаемое $\sigma^{(3)} |\tilde{v}|^2$ является небольшой поправкой для $\sigma^{(1)}$. Отсюда следует, что, как и прежде, приближенное решение уравнения (6) можно искать в виде

$$\tilde{v}_{N,M}(\zeta) = \sqrt{1-\zeta^2} \cdot \sum_{n=0}^N c_n^{(M)} U_n(\zeta) \quad (10)$$

с коэффициентами, определяемыми с помощью итерационной схемы

$$\sum_{n=0}^N c_n^{(M+1)} \left[Y_n(\zeta_k) - \gamma \sin((n+1) \arccos \zeta_k) \cdot \sigma_{N,M}(\zeta_k) \right] = \tilde{F}(\zeta_k), \quad (11)$$

где $M = 0, 1, \dots$,

$$\sigma_{N,M}(\zeta) = \sigma^{(1)} + \sigma^{(3)} |\tilde{v}_{N,M}|^2(\zeta).$$

В качестве начального приближения $\tilde{v}_{N,0}$ имеет смысл использовать линейное решение $\tilde{v}_N$.

Ясно, что для того чтобы получить хорошее приближенное решение уравнения (6), нужно увеличивать число слагаемых в сумме (10), а также число итераций в схеме (11), до тех пор пока «расстояние» между текущим решением

$$\tilde{v}^{**}(\zeta) = \sqrt{1-\zeta^2} \sum_{n=0}^{N^{**}} c_n^{**} U_n(\zeta)$$

и предыдущим решением

$$\tilde{v}^*(\zeta) = \sqrt{1-\zeta^2} \sum_{n=0}^{N^*} c_n^* U_n(\zeta)$$

не станет меньше некоторого заданного числа $\delta > 0$. Под «расстоянием» здесь имеется в виду равномерная норма $\|\tilde{v}^{**}(\zeta) - \tilde{v}^*(\zeta)\|$, которую можно оценить следующим образом:

$$\begin{aligned} \|\tilde{v}^{**}(\zeta) - \tilde{v}^*(\zeta)\| &= \max_{\zeta \in [-1,1]} |\tilde{v}^{**}(\zeta) - \tilde{v}^*(\zeta)| \leq \\ &\leq \sum_{n=0}^{N^{**}} \theta_n \max_{\zeta \in [-1,1]} \left| \sqrt{1-\zeta^2} \cdot U_n(\zeta) \right| \leq \sum_{n=0}^{N^{**}} \theta_n = D(\tilde{v}^{**}, \tilde{v}^*), \end{aligned} \quad (12)$$

где величины θ_n определяются как

$$\theta_n = \begin{cases} |c_n^{**} - c_n^*|, & 0 \leq n \leq N^*, \\ |c_n^{**}|, & N^* < n \leq N^{**}. \end{cases}$$

Результаты

Линейная часть проводимости графена состоит из межзонной и внутризонной составляющих, т.е. $\sigma^{(1)} = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$. Полагая, что графен сильно легирован $|\mu_c| \gg k_b T$, μ_c – химический потенциал, энергия фотонов падающей волны удовлетворяет неравенству $\hbar\omega \leq 2|\mu_c|$, компоненты σ_{intra} , σ_{inter} можно вычислить, используя формулы

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{intra}}(\Omega) &= \frac{ie^2}{\pi\hbar} \frac{1}{\Omega + i\nu_{\text{intra}}}, \\ \sigma_{\text{inter}}(\Omega) &= \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \frac{2 - |\Omega| - i\nu_{\text{inter}}}{2 + |\Omega| + i\nu_{\text{inter}}}, \end{aligned}$$

где $\Omega = \hbar\omega/\mu_c$, $\nu_{\text{intra}} = \hbar/(|\mu_c|\tau_{\text{intra}})$, $\nu_{\text{inter}} = \hbar/(|\mu_c|\tau_{\text{inter}})$ [16]. Заметим, что величины ν_{intra} и ν_{inter} призваны учесть потери, обусловленные рассеянием электронов при конечных температурах. В вычислениях будут использованы $\tau_{\text{intra}} = 100$ фс, $\tau_{\text{inter}} = 1$ пс и $\mu_c = 0,1$ эВ.

Нелинейный коэффициент $\sigma^{(3)}$ в проводимости графена определяется по формуле

$$\sigma^{(3)}(\Omega) = -i \frac{3}{32} \frac{e^2}{\pi\hbar} \frac{(eV_F)^2 \hbar^2}{\mu_c^4 \Omega^3},$$

где V_F есть скорость Ферми [11].

Ниже представлены некоторые численные результаты.

В вычислениях использованы следующие параметры: $k_1 = 1$ (воздух), $k_2 = 3,42$ (соответствует кремнию Si), $h = 0,6$. Считаем, что источник света расположен в точке с координатами $x_0 = 2h$, $z_0 = 0$ и излучает электромагнитную волну на частоте $\omega/2\pi = 3$ ТГц.

Подчеркнем, что безразмерная толщина h слоя Ω_2 должна коррелировать с его физическим размером. Действительно, h должна вычисляться по формуле $h = k_0 \tilde{h}$, где $\tilde{h}$ – реальная толщина слоя. Пусть $\tilde{h} = 10$ мкм. Для $\omega / 2\pi = 3$ ТГц имеем $k_0 \approx 6 \cdot 10^4$ м⁻¹. Отсюда находим $h \approx 0,6$.

Определим последовательность $a_k = kd$, $k = 1, 2, \dots, 6$, с шагом $d = 96$ (значение d выбрано кратным количеству процессоров, используемых для параллельных вычислений). Пусть $\tilde{v}_{(k)}(\zeta)$ и $\tilde{v}_{(k,m)}(\zeta)$ обозначают приближенные решения $\tilde{v}_{a_k}$ и $\tilde{v}_{a_{k,m}}$ соответственно интегрального уравнения (6), а D_k , $D_{k,m}$ обозначают расстояния между парами функций $\tilde{v}_{(k)}$, $\tilde{v}_{(k+1)}$ и $\tilde{v}_{(k,m)}$, $\tilde{v}_{(k,m+1)}$, т.е.

$$D_k = D(\tilde{v}_{(k)}(\zeta), \tilde{v}_{(k+1)}(\zeta)), \quad D_{k,m} = D(\tilde{v}_{(k,m)}(\zeta), \tilde{v}_{(k,m+1)}(\zeta)),$$

где функция расстояния D определена в (12).

На рис. 1, 2 представлены приближенные решения $\tilde{v}_{(k)} \equiv \tilde{v}_{(k)}(z)$ уравнения (6); переменная z связана с переменной ζ соотношением $\zeta = \tanh(z/2)$. Табл. 1 позволяет оценить расстояние между найденными приближенными решениями $\tilde{v}_{(k)}$.

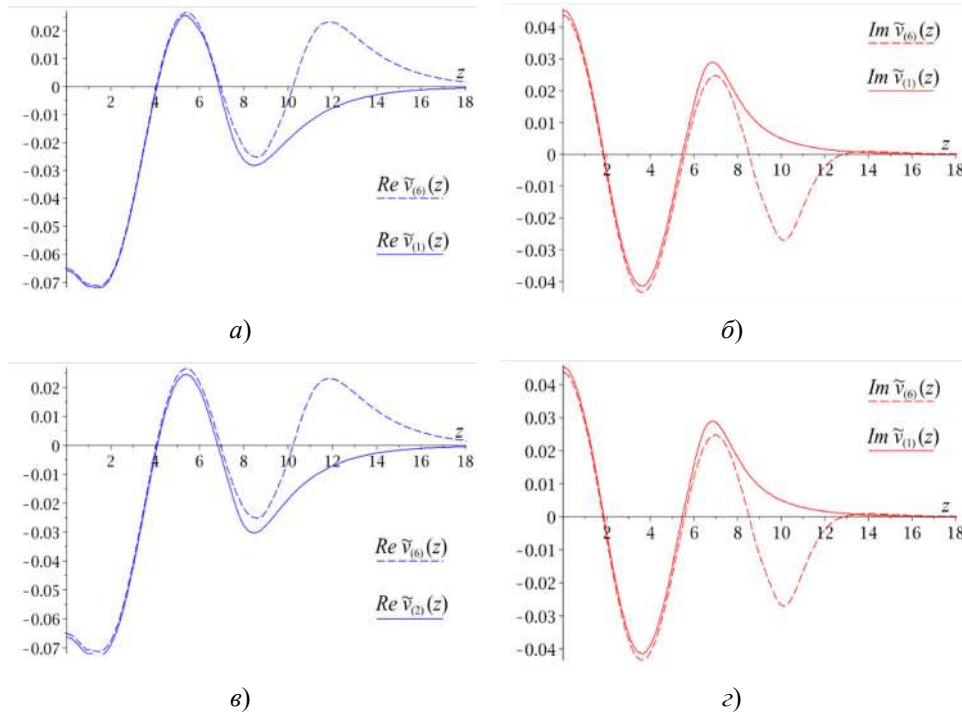


Рис. 1. Приближенные (линейные) решения уравнения (6)

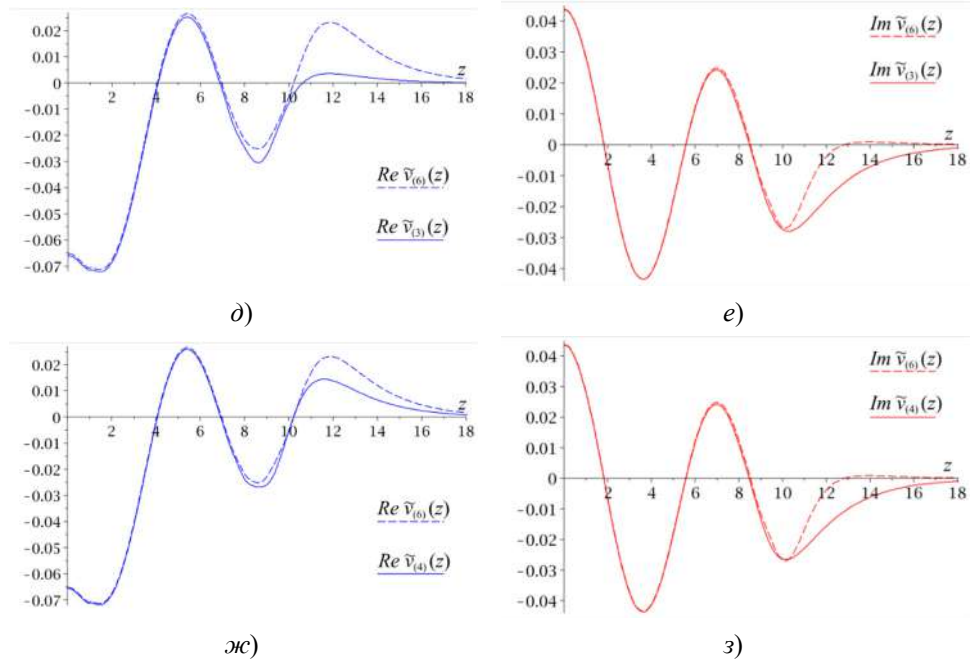


Рис. 1. Приближенные (линейные) решения уравнения (6). Окончание

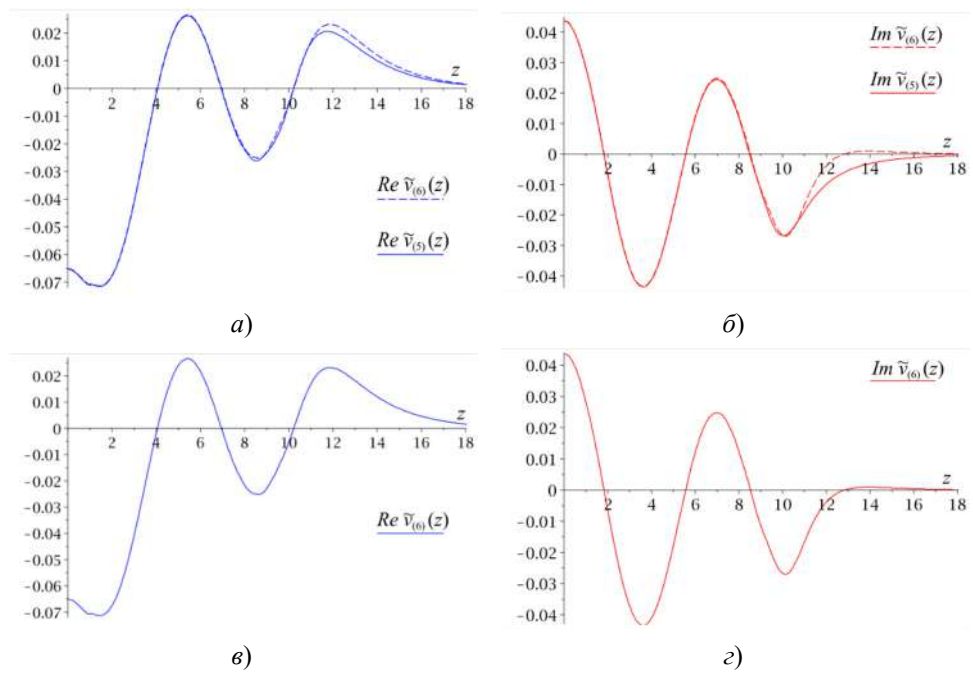


Рис. 2. Приближенные (линейные) решения уравнения (6)

Таблица 1

Сравнение приближенных решений уравнения (6) при $\sigma^{(3)} = 0$

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
$3,963 \cdot 10^{-2}$	$2,315 \cdot 10^{-2}$	$1,628 \cdot 10^{-2}$	$1,258 \cdot 10^{-2}$	$1,041 \cdot 10^{-2}$

Очевидно, что для того чтобы оптическая нелинейность графена стала заметна, амплитуда падающей волны должна быть достаточно большой. Для этого умножим u_{inc} на $A=10^7$ В·м⁻¹. Это приведет к появлению множителя A в правых частях уравнений (6), (9), (11).

На рис. 3 представлено приближенное (нелинейное) решение $\tilde{v}_{(6,5)}(\zeta)$ уравнения (6). В табл. 2 содержатся расстояния $D_{k,m}$.

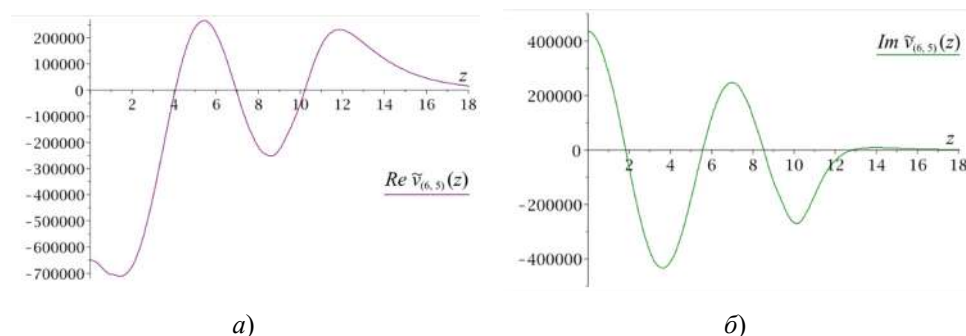


Рис. 3. Приближенные (нелинейные) решения уравнения (6)

Таблица 2

Сравнение приближенных решений уравнения (6) при $\sigma^{(3)} \neq 0$

$D_{5,0}$	$D_{5,1}$	$D_{5,2}$	$D_{5,3}$	$D_{5,4}$
3831	23	$1,481 \cdot 10^{-1}$	$9,227 \cdot 10^{-4}$	$5,67 \cdot 10^{-6}$

Представленные рисунки и таблицы наглядно демонстрируют работоспособность предложенного в работе метода. Разумеется, сходимость метода должна быть доказана аналитически. Автор планирует исследовать этот вопрос в будущих работах.

Заключение

В данной работе исследована задача дифракции монохроматической ТЕ-волны на двумерном слое, покрытом графеном, с учетом оптической нелинейности графена. Для решения этой задачи разработан эффективный математический метод. Главным преимуществом этого метода является то, что он не накладывает каких-либо ограничений на параметры задачи, в том числе частоту электромагнитной волны. Стоит подчеркнуть, что предложенный метод может быть применен для исследования и других двумерных материалов, оптические свойства которых описываются поверхностной проводимостью. Кроме того, задавая проводимость двумерного покрытия слоя кусочно-постоянной функций, с помощью обсуждаемого метода можно исследовать оптические свойства решеток из полос, изготовленных из графена или какого-либо другого двумерного материала.

Список литературы

1. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. [et al.]. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // *Science*. 2004. Vol. 306. P. 666–669. doi: 10.1126/science.1102896
2. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene // *Nature Materials*. 2007. Vol. 6. P. 183–191. doi: 10.1038/nmat1849
3. Bao Q., Zhang H., Wang Y. [et al.]. Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers // *Adv. Funct. Mater.* 2009. Vol. 19. P. 3077–3083. doi: 10.1002/adfm.200901007
4. Xia F., Mueller T., Lin Y. [et al.]. Ultrafast graphene photodetector // *Nature Nanotech.* 2009. Vol. 4. P. 839–843. doi: 10.1038/nnano.2009.292
5. Bai Y., Xu T., Zhang X. Graphene-Based Biosensors for Detection of Biomarkers // *Micromachines*. 2020. Vol. 11, № 1. P. 60. doi: 10.3390/mi11010060
6. Bao Q., Zhang H., Wang B. [et al.]. Broadband graphene polarizer // *Nat Photonics*. 2011. Vol. 5. P. 411–415. doi: 10.1038/nphoton.2011.102
7. Wang J., Liang Z., Chen Y. [et al.]. Saturable absorption in graphene-on-waveguide devices // *Appl. Phys. Express*. 2019. Vol. 12. P. 032003. doi: 10.7567/1882-0786/ab02ca
8. Liu M., Yin X., Zhang X. Double-layer graphene optical modular // *Nano Lett.* 2021. Vol. 12. P. 1482–1485. doi: 10.1021/nl204202k
9. Guo X., Wang W., Nan H. [et al.]. High-performance graphene photodetector using interfacial gating // *Optica*. 2016. Vol. 3. P. 1066–1070. doi: 10.1364/OPTICA.3.001066
10. Mikhailov S. A. Non-linear electromagnetic response of graphene // *Europhysics Letters*. 2007. Vol. 79, № 2. P. 27002. doi: 10.1209/0295-5075/79/27002
11. Mikhailov S. A., Ziegler K. Nonlinear electromagnetic response of graphene: frequency multiplication and self-consistent field effects // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008. Vol. 20, № 38. P. 384204. doi: 10.1088/0953-8984/20/38/384204
12. Ooi K. J. A., Cheng J. L., Sipe J. E. [et al.]. Ultrafast, broadband, and configurable midinfrared all-optical switching in nonlinear graphene plasmonic waveguides // *APL Photonics*. 2016. Vol. 1, № 4. P. 046101. doi: 10.1063/1.4948417
13. Li J., Tao J., Chen Z. H., Huang X. G. All-optical controlling based on nonlinear graphene plasmonic waveguides // *Opt. Express*. 2016. Vol. 24, № 19. P. 22169–22176. doi: 10.1364/OE.24.022169
14. Polianin A. D., Nazaikinskii V. E. Handbook of linear partial differential equations for engineers and scientists. 2nd ed. New York : Chapman and Hall/CRC, 2016. 1643 p.
15. Ervin V. J., Stephan E. P. Collocation with Chebyshev polynomials for a hypersingular integral equation on an interval // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1992. Vol. 43, № 1. P. 221–229. doi: 10.1016/0377-0427(92)90267-2
16. Mikhailov S. A., Ziegler K. New electromagnetic mode in graphene // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99. P. 016803. doi: 10.1103/PhysRevLett.99.016803

References

1. Novoselov K. S., Geim A.K., Morozov S.V. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*. 2004;306:666–669. doi: 10.1126/science.1102896
2. Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of graphene. *Nature Materials*. 2007;6:183–191. doi: 10.1038/nmat1849
3. Bao Q., Zhang H., Wang Y. et al. Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers. *Adv. Funct. Mater.* 2009;19:3077–3083. doi: 10.1002/adfm.200901007
4. Xia F., Mueller T., Lin Y. et al. Ultrafast graphene photodetector. *Nature Nanotech.* 2009;4:839–843. doi: 10.1038/nnano.2009.292
5. Bai Y., Xu T., Zhang X. Graphene-Based Biosensors for Detection of Biomarkers. *Micromachines*. 2020;11(1):60. doi: 10.3390/mi11010060

6. Bao Q., Zhang H., Wang B. et al. Broadband graphene polarizer. *Nat Photonics*. 2011;5:411–415. doi: 10.1038/nphoton.2011.102
7. Wang J., Liang Z., Chen Y. et al. Saturable absorption in graphene-on-waveguide devices. *Appl. Phys. Express*. 2019;12:032003. doi: 10.7567/1882-0786/ab02ca
8. Liu M., Yin X., Zhang X. Double-layer graphene optical modular. *Nano Lett*. 2021;12:1482–1485. doi: 10.1021/nl204202k
9. Guo X., Wang W., Nan H. et al. High-performance graphene photodetector using interfacial gating. *Optica*. 2016;3:1066–1070. doi: 10.1364/OPTICA.3.001066
10. Mikhailov S.A. Non-linear electromagnetic response of graphene. *Europhysics Letters*. 2007;79(2):27002. doi: 10.1209/0295-5075/79/27002
11. Mikhailov S.A., Ziegler K. Nonlinear electromagnetic response of graphene: frequency multiplication and self-consistent field effects. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008;20(38):384204. doi: 10.1088/0953-8984/20/38/384204
12. Ooi K.J.A., Cheng J.L., Sipe J.E. et al. Ultrafast, broadband, and configurable midinfrared all-optical switching in nonlinear graphene plasmonic waveguides. *APL Photonics*. 2016;1(4):046101. doi: 10.1063/1.4948417
13. Li J., Tao J., Chen Z.H., Huang X.G. All-optical controlling based on nonlinear graphene plasmonic waveguides. *Opt. Express*. 2016;24(19):22169–22176. doi: 10.1364/OE.24.022169
14. Polianin A.D., Nazaikinskii V.E. *Handbook of linear partial differential equations for engineers and scientists. 2nd ed.* New York: Chapman and Hall/CRC, 2016:1643.
15. Ervin V.J., Stephan E.P. Collocation with Chebyshev polynomials for a hypersingular integral equation on an interval. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1992;43(1):221–229. doi: 10.1016/0377-0427(92)90267-2
16. Mikhailov S.A., Ziegler K. New electromagnetic mode in graphene. *Phys. Rev. Lett*. 2007;99:016803. doi: 10.1103/PhysRevLett.99.016803

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Вячеславович Тихов
аспирант,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tik.stanislav2015@yandex.ru

Stanislav V. Tikhov
Postgraduate student,
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 22.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2024

Принята к публикации/Accepted 17.12.2024

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ПОПИКСЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПАТОЛОГИЙ В КОЛОНОСКОПИИ

**В. В. Хрящев¹, А. Л. Приоров²,
Н. В. Котов³, К. И. Малыгин⁴**

^{1, 2, 3, 4} Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия
¹ v.khryashchev@uniyar.ac.ru, ² pri@uniyar.ac.ru,
³ nik-kotov-98@inbox.ru, ⁴ maliginkirill@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На современном этапе развития систем высокотехнологичной медицины колоноскопическое исследование является наиболее эффективным способом ранней диагностики колоректального рака. Наиболее типичной аномалией, приводящей к высокому риску возникновения онкологических заболеваний, является появление и развитие колоректальных полипов – новообразований размером в несколько миллиметров. Их обнаружение во время колоноскопического исследования представляет собой исключительно важную задачу для врача-эндоскописта. Целью работы является дальнейшее совершенствование алгоритмов автоматического обнаружения полипов с использованием методов цифровой обработки изображений для использования их в системах поддержки принятия врачебного решения реального времени. *Материалы и методы.* Проведено исследование эффективности использования ряда классических и нейросетевых алгоритмов сегментации изображений. Для обучения и тестирования алгоритмов глубокого машинного обучения использовались стандартная открытая база изображений полипов Kvasir-SEG, а также собственная база изображений, полученная и размеченная в эндоскопическом отделении Ярославской областной клинической онкологической больницы. *Результаты.* Показано достижение существенного превосходства нейросетевых алгоритмов сегментации над классическими подходами и алгоритмами. По метрике коэффициента Дайса наилучший результат показывает нейросетевая архитектура Meta-Polyr, достигающая значения коэффициента в 0,933 при использовании комбинированной базы тестовых изображений полипов. *Выводы.* Рассмотренные алгоритмы будут служить основой для разработки программно-аппаратного комплекса с алгоритмическим модулем обнаружения патологий на колоноскопических изображениях.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, детектирование объектов, сегментация объектов, нейронные сети, машинное обучение, колоноскопия, колоректальные полипы

Для цитирования: Хрящев В. В., Приоров А. Л., Котов Н. В., Малыгин К. И. Использование алгоритмов цифровой обработки изображений в задаче попиксельного детектирования патологий в колоноскопии // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 86–97. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-7

USING DIGITAL IMAGE PROCESSING ALGORITHMS IN THE TASK OF PIXEL-BY-PIXEL DETECTION OF PATHOLOGIES IN COLONOSCOPY

V.V. Khryashchev¹, A.L. Priorov², N.V. Kotov³, K.I. Malygin⁴

^{1, 2, 3, 4} P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

¹ v.khryashchev@uniyar.ac.ru, ² pri@uniyar.ac.ru,

³ nik-kotov-98@inbox.ru, ⁴ maliginkirill@yandex.ru

Abstract. *Background.* At the current stage of high-tech medicine systems development, colonoscopy is the most effective way of early diagnosis of colorectal cancer. The most typical anomaly leading to a high risk of cancer is the appearance and development of colorectal polyps – neoplasms several millimeters in size. Their detection during a colonoscopic examination is an extremely important task for an endoscopist. The aim of the work is to further improve the algorithms for automatic detection of polyps using digital image processing methods for their use in real-time medical decision support systems. *Materials and methods.* A study was conducted to evaluate the efficiency of using a number of classical and neural network image segmentation algorithms. For training and testing deep machine learning algorithms, a standard open database of polyp images – Kvasir-SEG, as well as our own database of images obtained and labeled in the endoscopic department of the Yaroslavl Regional Clinical Oncology Hospital, were used. *Results.* A significant superiority of neural network segmentation algorithms over classical approaches and algorithms was demonstrated. According to the Dice coefficient metric, the best result was shown by the Meta-Polyp neural network architecture, reaching a coefficient value of 0.933 when using a combined database of test polyp images. *Conclusions.* The considered algorithms will serve as the basis for developing a hardware and software complex with an algorithmic module for detecting pathologies in colonoscopic images.

Keywords: digital image processing, object detection, object segmentation, neural networks, machine learning, colonoscopy, colorectal polyps

For citation: Khryashchev V.V., Priorov A.L., Kotov N.V., Malygin K.I. Using digital image processing algorithms in the task of pixel-by-pixel detection of pathologies in colonoscopy. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):86–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-7

Введение

Медицина всегда являлась областью, где широко применялись современные информационные технологии. Это относится и к визуальным технологиям, которые уже много лет успешно используются как в медицинской диагностике, так и при лечении различных заболеваний. Примерами могут служить алгоритмы цифровой обработки изображений, используемые при анализе рентгеновских снимков, а также данных, полученных с устройств магнитно-резонансной и компьютерной томографии. Несколько позднее визуальные системы стали использовать совместно с системами искусственного интеллекта (ИИ), что значительно расширило возможности врачей по ранней диагностике заболеваний и их своевременному и эффективному лечению. Совместное использование систем машинного зрения и ИИ помогает обнаруживать такие аномалии, которые в отдельных случаях сложно заметить даже

опытному врачу, что в итоге приводит к более быстрой и точной диагностике многих опасных заболеваний [1–3].

Важным направлением внедрения систем ИИ является эндоскопия. Получаемые при эндоскопическом обследовании видеофрагменты и отдельные изображения обрабатываются с использованием методов глубокого машинного обучения с целью обнаружения соответствующих объектов интереса (опухоли различной природы, полипы, аденомы и др.) и их последующей классификации.

В настоящее время колоректальный рак является одним из самых распространенных онкологических заболеваний. Колоноскопия – ключевой метод диагностики, позволяющий обнаружить как злокачественные, так и доброкачественные образования в толстом кишечнике. Современные технологии, такие как узкоспектральная и увеличительная эндоскопия, значительно улучшают выявление рака на ранних стадиях. Установлено, что регулярная колоноскопия и своевременное удаление полипов после нее могут предотвратить до 90 % случаев колоректального рака [4, 5].

Однако даже при тщательных обследованиях врачи-эндоскописты пропускают полипы. Установлено, что порядка 20 % полипов не выявляется. Для повышения точности подобной диагностики разрабатываются автоматизированные системы обнаружения полипов. В частности, современные нейросетевые алгоритмы сегментации могут заметно улучшить качество диагностики и хирургических процедур [6–8].

Одним из наиболее часто используемых подходов является попиксельное детектирование (сегментация). При этом изображение разбивается на области, представляющие различные классы объектов, в рамках данной прикладной области интереса это полипы и фон. Существующие подходы можно условно разделить на классические методы и методы с использованием нейронных сетей [9, 10]. Установлено, что первые чаще всего уступают вторым, показывающим более высокие точность и эффективность в целом ряде практических медицинских приложений.

Целью работы является исследование классических и нейросетевых алгоритмов сегментации колоректальных полипов на изображениях эндоскопического обследования, учитывая ограниченность доступных баз данных и необходимость в экспертной аннотации изображений. Данный материал является продолжением работ группы авторов и фокусируется на более сложной задаче попиксельного детектирования области нахождения полипа на видеокадре колоноскопического исследования.

Базы изображений полипов

Для проведения сравнительного анализа между различными исследованиями алгоритмов детектирования и сегментации полипов на колоноскопических изображениях критически важным является наличие открыто распространяемой и экспертно размеченной базы изображений. Наибольшее распространение в данной сфере получила база изображений Kvasir-SEG, содержащая 1000 экспертно размеченных кадров сохраненных видеоданных исследований толстой кишки [11, 12]. В ней содержатся изображения 1072 полипов, при этом их размер в пикселях варьируется от нескольких десятков

до нескольких сотен. В ней также хранятся экспертные бинарные шаблоны (маски), соответствующие областям попиксельного выделения области полипов, как показано на рис. 1.

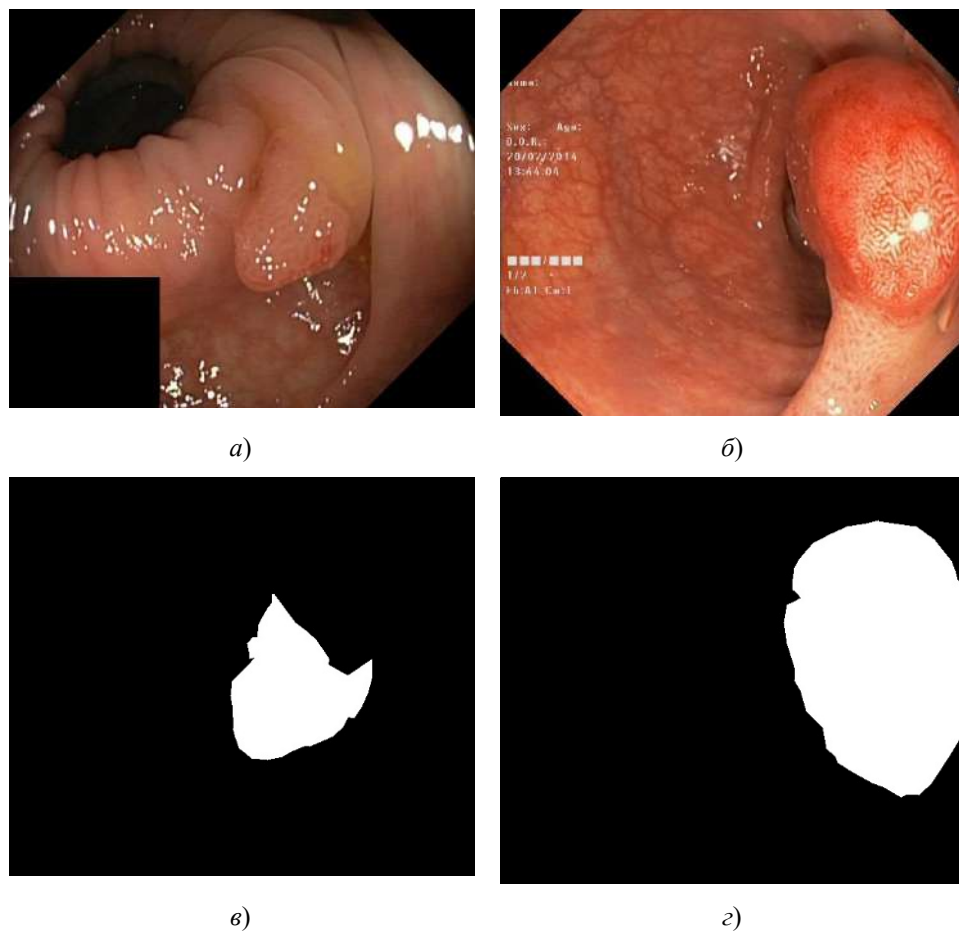


Рис. 1. Полипы: *а, б* – примеры кадров колоноскопического исследования; *в, г* – соответствующие им бинарные шаблоны из базы Kvasir-SEG

Из анализа современной научно-технической литературы известно, что базу изображений Kvasir-SEG можно использовать для решения задач детектирования (обнаружения), а также задач сегментации (кластеризации) полипов. К сожалению, для многих практических задач по обучению современных моделей нейронных сетей, в том числе и сетей глубокого обучения, ее объем не является достаточным, поэтому возникает необходимость в создании дополнительных баз изображений полипов, используемых для обучения и тестирования современных нейросетевых моделей.

В ходе работы кроме базы изображений Kvasir-SEG использовалась также база из 206 медицинских изображений с полипами и соответствующими шаблонами попиксельного выделения области полипов. Видеокадры колоноскопических исследований взяты из данных, предоставленных эндоскопическим отделением Ярославской областной клинической онкологической больницы. Разрешение изображений составляло 626×532 пикселя.

Данный набор изображений является расширением базы OnkoYar-SEG, описанной в работе [7]. Ручное экспертное выделение области полипа на изображении осуществлялось с помощью открытого программного обеспечения labelme [13]. Процесс выделения показан на рис. 2. Файл с разметкой хранится в формате JSON.

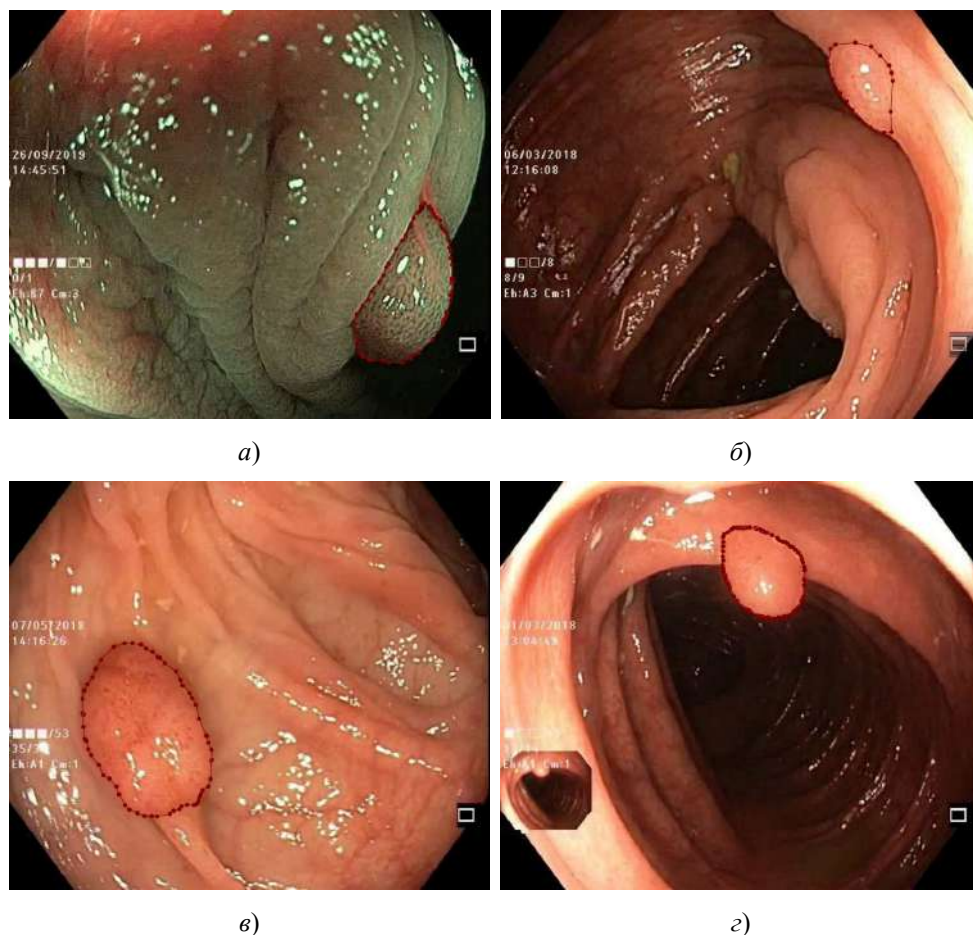


Рис. 2. Примеры размеченных изображений из базы OnkoYar-SEG

Исследование классических методов сегментации

Одним из наиболее известных классических алгоритмов сегментации является метод кластеризации *k-means* [14]. Он минимизирует суммарное квадратичное отклонение точек, принадлежащих кластерам, от их центроидов. Метод *k-means* делит множество пикселей изображений на k кластеров, стремясь к тому, чтобы точки внутри кластера были максимально близки к его центроиду. Процесс кластеризации осуществляется путем итеративного перемещения центроидов до достижения их стабилизации.

Исследования по практическому применению метода *k-means* при разных значениях числа кластеров k показали его низкую эффективность при работе с реальными колоноскопическими изображениями. Визуальные результаты приведены на рис. 3.

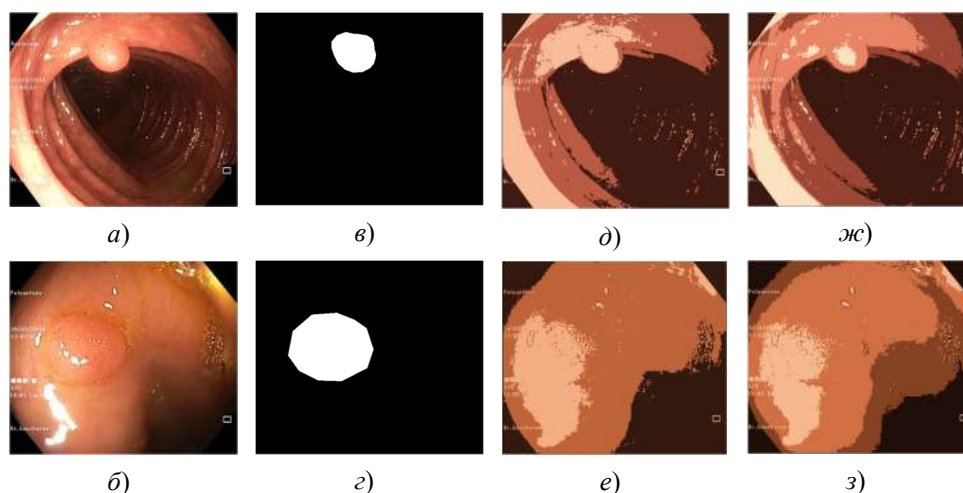


Рис. 3. Результаты работы алгоритма на базе метода *k-means*:

a, б – кадры колоноскопического исследования; *в, г* – бинарные шаблоны;
д, е – результаты сегментации при $k = 3$; *ж, з* – результаты сегментации при $k = 4$

Другим популярным классическим методом сегментации является метод Оцу (Otsu), основанный на анализе гистограммы интенсивности пикселей изображения [15]. Гистограмма представляет собой графическое отображение распределения интенсивностей пикселей, где ось абсцисс соответствует значениям интенсивности в диапазоне $[0, 255]$, а ось ординат – количеству пикселей для каждой интенсивности. Метод Оцу представляет пороговое значение на гистограмме, разделяющее все пиксели на два класса. Для этого минимизируется внутриклассовая дисперсия, это означает, что пиксели внутри каждого класса должны быть максимально однородными. Таким образом, пороговое значение обеспечивает максимально возможное разделение классов по яркости, что способствует наиболее четкому выделению фона и объекта интереса.

Однако при практическом применении данного алгоритма к задаче сегментации полипов на колоноскопических изображениях результаты также оказываются неудовлетворительными (рис. 4).

На основании результатов сегментации полипов с использованием классических методов можно констатировать их недостаточную эффективность в решении данной задачи. Это обусловлено следующими основными факторами:

1. Медицинские изображения характеризуются наличием различных шумов, что существенно затрудняет работу классических алгоритмов сегментации, которые демонстрируют высокую чувствительность к подобным артефактам.

2. Классические методы сегментации не принимают во внимание пространственные и контекстуальные особенности изображений, в то время как при анализе сложных изображений важно учитывать форму и границы объектов, а также их взаиморасположение в контексте общего изображения.

3. Традиционные алгоритмы опираются на цветовую информацию изображений, однако полипы могут обладать цветом и текстурой, схожей с окружающими их обычными тканями толстой кишки, что приводит к некорректной сегментации.

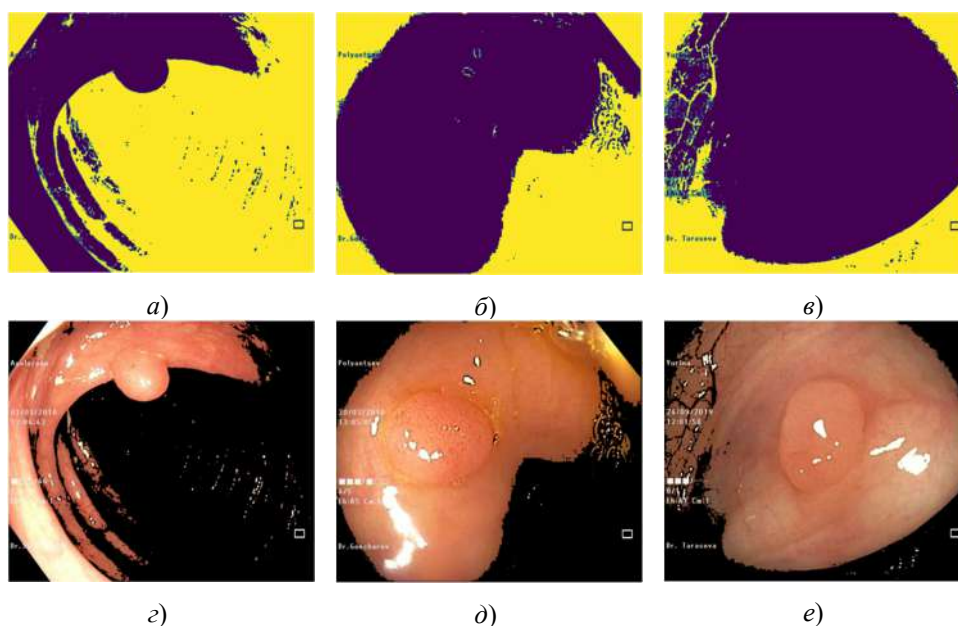


Рис. 4. Примеры сегментации полипов методом Оцу:
а–в – полученные этим методом маски;
г–е – результаты наложения масок на исходные изображения

Исследование нейросетевых алгоритмов сегментации

В ходе исследования проведено обучение и тестирование нейросетевых алгоритмов на базе следующих архитектур: SSformer-S, SSformer-L, U-Net, U-Net++, DUCK-Net-17, DUCK-Net-34, Meta-Polyp [16–21]. Для обучения и тестирования использовались ранее описанные базы изображений Kvasir-SEG и OnkoYar-SEG, содержащие полипы толстой кишки, изображения которых делились на обучающую, валидационную и тестовую выборки в стандартной пропорции.

Параметры обучения, которые использовались в проведенных программных экспериментах, имели следующий вид: функция потерь – BCE, оптимизатор – Adam (параметры $\beta_1 = 0,9$; $\beta_2 = 0,999$; $\varepsilon = 10^{-8}$), число эпох обучения – 200; постоянная скорость обучения – 0,001. Важно отметить, что судить о возможности использования полученных результатов для оценки эффективности рассматриваемых нейросетевых архитектур помогает фиксация указанных гиперпараметров.

Для сравнения качества работы алгоритмов сегментации использовался коэффициент Дайса (Dice) [22], принимающий значения от 0 до 1 и определяемый как отношение двойного размера пересечения множеств (например, A и B) к их сумме:

$$Dice = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN},$$

здесь A – предсказанное алгоритмом множество пикселей; B – множество пикселей эталонной маски; $|A \cap B|$ – количество элементов, которое присутствует в обоих множествах; TP (true positive) – истинно положительный результат,

т.е. количество правильно обнаруженных пикселей; FP (false positive) – ложноположительный результат, т.е. количество пикселей, определенных алгоритмом ошибочно (приняты им за объект патологии); FN (false negative) – ложноотрицательный результат – количество пикселей, относящихся к объектам интереса (хотя алгоритм их к ним не отнес).

Архитектура нейронной сети Meta-Polyp, показавшей наилучшие результаты тестирования, представлена на рис. 5,а. Вход сети имеет размерность $X \in R^{Width \times Height \times 3}$, $X \in R^{\frac{W}{2^{i+1}} \times \frac{H}{2^{i+1}} \times F_i}$, где $F_i \in \{64; 128; 320; 512\}; i \in \{1; 2; 3; 4\}$ – фильтр на шаге i -го этапа кодера и декодера. На этапе декодера признак декодируется дважды. Затем он объединяется с признаком на $i+2$ -м шаге для улучшения и повышения частоты дискретизации. Декодер генерирует маску и преобразует карту признаков в 1-й фильтр. Блок «Конформер» состоит из нескольких блоков, показанных на рис. 5,б.

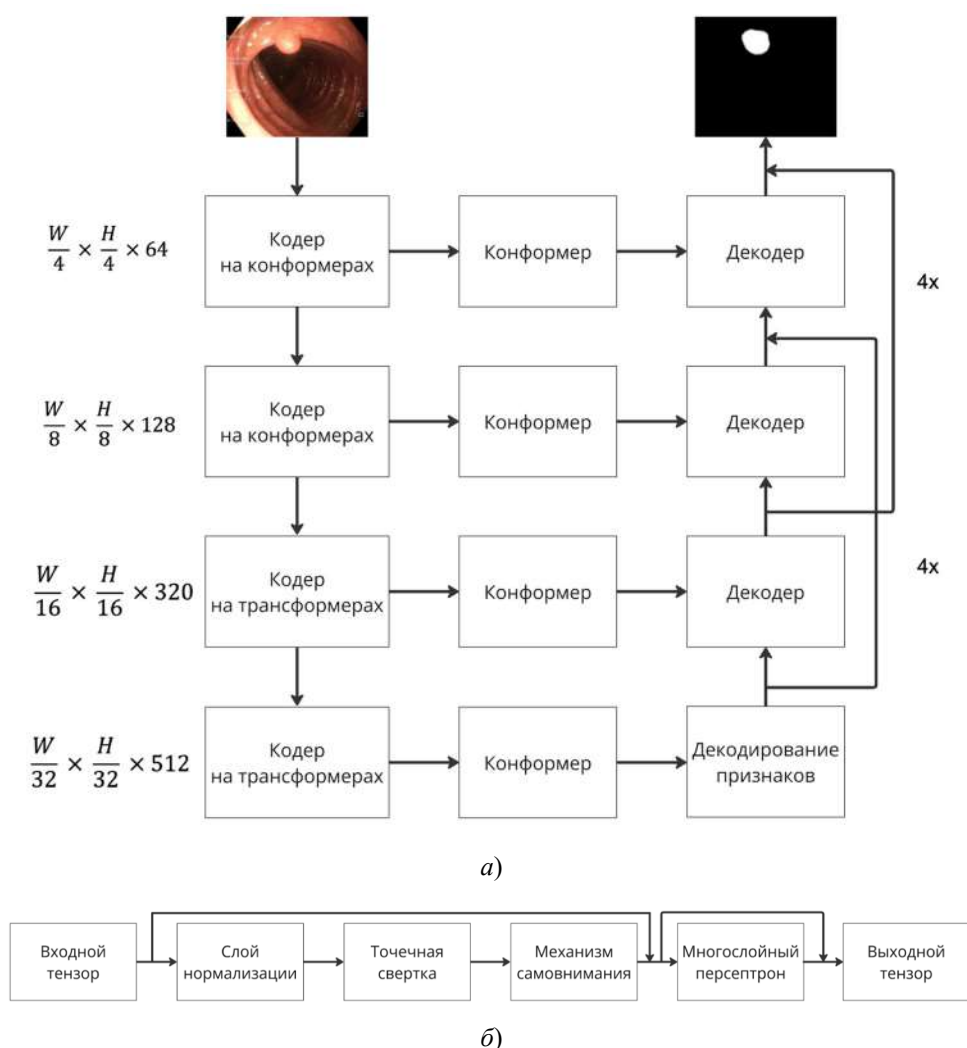


Рис. 5. Архитектура нейронной сети Meta-Polyp:
а – общая схема сети; б – схема блока «Конформер»

Результаты тестирования нейросетевых алгоритмов по метрике Дайса для двух рассматриваемых наборов изображений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента Дайса

Набор данных	Нейросетевая архитектура						
	SSformer-S	SSformer-L	U-Net	U-Net++	DUCK-Net-17	DUCK-Net-34	Meta-Polyp
Kvasir-SEG	0,960	0,939	0,812	0,810	0,891	0,907	0,952
OnkoYar-SEG	0,882	0,892	0,715	0,702	0,711	0,757	0,855
OnkoYar-SEG + Kvasir-SEG	0,908	0,907	0,759	0,751	0,805	0,833	0,933

Наилучшие результаты на наборе Kvasir-SEG достигнуты с применением архитектуры SSformer-S, которая продемонстрировала коэффициент Дайса 0,96, а наихудшие – с использованием архитектуры U-Net++, где этот коэффициент составил всего 0,81.

Дополнительно проведены тесты на собственной базе данных из 206 изображений OnkoYar-SEG. Здесь наилучший результат достигнут с использованием архитектуры SSformer-L с коэффициентом Дайса 0,892, а наихудший снова получен с использованием архитектуры U-Net++, с коэффициентом Дайса 0,702.

Проведены тесты на объединенной базе данных, включающей 206 изображений из базы OnkoYar-SEG и 100 изображений из базы Kvasir-SEG. Здесь наилучший результат достигнут с использованием архитектуры Meta-Polyp с коэффициентом Дайса 0,933, а наихудший – вновь при использовании архитектуры U-Net++, где коэффициент Дайса составил 0,751.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что архитектуры SSformer-S и SSformer-L, а также Meta-Polyp эффективно справляются с задачей сегментации полипов. Они демонстрируют высокую точность в определении границ и контуров полипов, превосходя классическую для задач сегментации объектов на изображениях архитектуру U-Net на 19–27 % по коэффициенту Дайса.

Заключение

Рассмотрено решение задачи сегментации полипов на изображениях, полученных при колоноскопических обследованиях как классическими методами (*k-means* и Оцу), так и методами на основе современных нейросетевых архитектур. Результаты тестирования показали, что классические алгоритмы дают неудовлетворительный практический результат.

Нейросетевые алгоритмы показывают, что при обучении их на базах с размерностью порядка 1000 изображений, они дают хорошие результаты сегментации. Среди них выделяются архитектуры SSformer, а также Meta-Polyp. Дополнительное тестирование на собственной базе изображений полипов OnkoYar-SEG показывает снижение качества работы нейросетевых алгоритмов по метрике коэффициента Дайса на 5–10 %.

Рассмотренные алгоритмы будут служить основой для разработки программно-аппаратного комплекса с алгоритмическим модулем обнаружения патологий на колоноскопических изображениях.

Список литературы

1. Карпов О. Э., Храмов А. Е. Информационные технологии, вычислительные системы и искусственный интеллект в медицине. М. : ДПК Пресс, 2022. 480 с.
2. Клетте Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / пер. с англ. А. А. Слинкин. М. : ДМК Пресс, 2019. 506 с.
3. Rangayyan R. M. Biomedical Image Analysis. Boca Raton : CRC Press, 2005. 1306 p.
4. Кашин С. В., Нехайкова Н. В., Завьялов Д. В. [и др.]. Скрининг колоректального рака: общая ситуация в мире и рекомендованные стандарты качества колоноскопии // Доказательная гастроэнтерология. 2017. С. 32–52.
5. Никонов Е. Л., Аксенов В. А., Кашин С. В., Нехайкова Н. В. Международный опыт скрининга колоректального рака // Доказательная гастроэнтерология. 2017. Т. 6, № 3. С. 30–35.
6. Хрящев В. В. Анализ видеоизображений для контроля соблюдения стандартов качества в колоноскопии // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 182–186.
7. Хрящев В. В. Сегментация изображений полипов при колоноскопическом исследовании с использованием нейронных сетей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 66–72.
8. Хрящев В. В., Приоров А. Л., Лебедев А. А., Котов Н. А. Обнаружение полипов на колоноскопических изображениях при помощи алгоритмов на базе нейросетевой архитектуры YOLO // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 27–31.
9. Приоров А. Л., Хрящев В. В., Топников А. И. Обработка и передача мультимедийной информации : учеб. пособие. Ярославль : ЯрГУ, 2022. 248 с.
10. Бабаян П. В., Муравьев В. С., Смирнов С. А., Стротов В. В. Обработка изображений в системах обнаружения и сопровождения объектов. Классические методы : учеб. пособие для вузов. М. : Горячая линия – Телеком, 2024. 168 с.
11. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. [et al.]. Kvasir-seg: A Segmented Polyp Dataset // Proc. of International Conference on Multimedia Modeling. 2020. P. 451–462.
12. Jha D., Ali S., Tomar N. K. [et al.]. Real-Time Polyp Detection, Localization and Segmentation in Colonoscopy Using Deep Learning // Computer Vision and Pattern Recognition. 2021. P. 40496–40510.
13. Image Polygonal Annotation with Python // LabelMe. URL: <https://github.com/wkentaro/labelme> (дата обращения: 10.07.2024).
14. Ahmed M., Seraj R., Islam S. M. S. The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation // Electronics. 2020. Т. 9, № 8. P. 1295.
15. Liu D., Yu J. Otsu method and K-means // Ninth International conference on hybrid intelligent systems // Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems. 2009. Vol. 1. P. 344–349.
16. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9351. P. 234–241.
17. Zhou Z., Siddiquee M., Tajbakhsh N., Liang J. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. 2018.
18. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. [et al.]. ResUNet++: An Advanced Architecture for Medical Image Segmentation // 21st IEEE International Symposium on Multimedia. 2019.
19. Shi W., Xu J., Gao P. SSformer: A Lightweight Transformer for Semantic Segmentation. 2022.
20. Dumitru R. G., Peteleaza D., Craciun C. Using DUCK-Net for polyp image segmentation // Scientific reports. 2023. Т. 13, № 1. P. 9803.
21. Trinh Q. H. Meta-Polyp: a baseline for efficient Polyp segmentation // IEEE 36th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). 2023. P. 742–747.

22. Carass A., Roy S., Gherman A. [et al.]. Evaluating White Matter Lesion Segmentations with Refined Sørensen-Dice Analysis // *Sci Rep*. 2020. Vol. 10 (1). P. 8242. doi: 10.1038/s41598-020-64803

References

1. Karpov O.E., Khramov A.E. *Informatsionnye tekhnologii, vychislitel'nye sistemy i iskusstvennyy intellekt v meditsine = Information technologies, computing systems and artificial intelligence in medicine*. Moscow: DPK Press, 2022:480. (In Russ.)
2. Klette R. *Komp'yuternoe zrenie. Teoriya i algoritmy / per. s angl. A. A. Slinkin = Computer vision. Theory and Algorithms / translated from English by A. A. Slinkin*. Moscow: DMK Press, 2019:506. (In Russ.)
3. Rangayyan R.M. *Biomedical Image Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2005:1306.
4. Kashin S.V., Nekhaykova N.V., Zav'yalov D.V. et al. Colorectal cancer screening: the general situation in the world and recommended colonoscopy quality standards. *Dokazatel'naya gastroenterologiya = Evidence-based gastroenterology*. 2017:32–52. (In Russ.)
5. Nikonov E.L., Aksenov V.A., Kashin S.V., Nekhaykova N.V. International experience in colorectal cancer screening. *Dokazatel'naya gastroenterologiya = Evidence-based gastroenterology*. 2017;6(3):30–35. (In Russ.)
6. Khryashchev V.V. Analysis of video images for monitoring compliance with quality standards in colonoscopy. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. st. XXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of computer science in education, management, economics and technology : collection of Articles XXIII International scientific and technical conf*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:182–186. (In Russ.)
7. Khryashchev V.V. Segmentation of images of polyps during colonoscopic examination using neural networks. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radio electronics*. 2023;26(4):66–72. (In Russ.)
8. Khryashchev V.V., Priorov A.L., Lebedev A.A., Kotov N.A. Detection of polyps on colonoscopic images using algorithms based on the YOLO neural network architecture. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2023;(3):27–31. (In Russ.)
9. Priorov A.L., Khryashchev V.V., Topnikov A.I. *Obrabotka i peredacha mul'timediynoy informatsii: ucheb. posobie = Processing and transmission of multimedia information : a textbook*. Yaroslavl': YarGU, 2022:248. (In Russ.)
10. Babayan P.V., Murav'ev V.S., Smirnov S.A., Strotov V.V. *Obrabotka izobrazheniy v sistemakh obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov. Klassicheskie metody: ucheb. posobie dlya vuzov = Image processing in object detection and tracking systems. Classical methods : a textbook for universities*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2024:168. (In Russ.)
11. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. et al. Kvasir-seg: A Segmented Polyp Dataset. *Proc. of International Conference on Multimedia Modeling*. 2020:451–462.
12. Jha D., Ali S., Tomar N.K. et al. Real-Time Polyp Detection, Localization and Segmentation in Colonoscopy Using Deep Learning. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2021:40496–40510.
13. Image Polygonal Annotation with Python. *LabelMe*. Available at: <https://github.com/wkentaro/labelme> (accessed 10.07.2024).
14. Ahmed M., Seraj R., Islam S.M.S. The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation. *Electronics*. 2020;9(8):1295.
15. Liu D., Yu J. Otsu method and K-means. Ninth International conference on hybrid intelligent systems. *Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. 2009;1:344–349.
16. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*. 2015;9351:234–241.

17. Zhou Z., Siddiquee M., Tajbakhsh N., Liang J. *UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation*. 2018.
18. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. et al. ResUNet++: An Advanced Architecture for Medical Image Segmentation. *21st IEEE International Symposium on Multimedia*. 2019.
19. Shi W., Xu J., Gao P. *SSformer: A Lightweight Transformer for Semantic Segmentation*. 2022.
20. Dumitru R.G., Peteleaza D., Craciun C. Using DUCK-Net for polyp image segmentation. *Scientific reports*. 2023;13(1):9803.
21. Trinh Q.H. Meta-Polyp: a baseline for efficient Polyp segmentation. *IEEE 36th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS)*. 2023:742–747.
22. Carass A., Roy S., Gherman A. et al. Evaluating White Matter Lesion Segmentations with Refined Sørensen-Dice Analysis. *Sci Rep*. 2020;10(1):8242. doi: 10.1038/s41598-020-64803

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Вячеславович Хрящев

кандидат технических наук,
доцент кафедры цифровых технологий
и машинного обучения,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: v.khryashchev@uniyar.ac.ru

Vladimir V. Khryashchev

Candidate of technical sciences, associate
professor of the sub-department of digital
technologies and machine learning,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Андрей Леонидович Приоров

доктор технических наук, профессор
кафедры цифровых технологий
и машинного обучения,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: v.khryashchev@uniyar.ac.ru

Andrey L. Priorov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of digital
technologies and machine learning,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Никита Валерьевич Котов

аспирант,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: nik-kotov-98@inbox.ru

Nikita V. Kotov

Postgraduate student,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Кирилл Игоревич Малыгин

магистрант,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: maliginkirill@yandex.ru

Kirill I. Malygin

Master degree student,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 14.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 13.12.2024

Принята к публикации/Accepted 17.12.2024

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ КРЕДИТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В. В. Иванов¹, Е. П. Акишина², А. С. Приказчикова³

^{1, 2} Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., Россия

³ Федеральная служба по финансовому мониторингу, Москва, Россия

¹ ivanov@jinr.ru, ² eakishina@mail.ru, ³ aska4.92@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предметом настоящего исследования являются разработка и оптимизация математических моделей для анализа финансового состояния кредитных организаций на основе искусственных нейронных сетей. Актуальность исследования обусловливается необходимостью внедрения современных вычислительных технологий, с использованием которых Банк России сможет превентивно реагировать на возможные риски в банковской сфере. *Материалы и методы.* В рамках исследования развит новый подход для анализа и оценки деятельности кредитных организаций на основе искусственных нейронных сетей. Проведен анализ состава показателей с использованием матрицы коэффициентов корреляций Пирсона и метода главных компонент. Удалось сократить объем выборки, подаваемой на вход нейронной сети, сохранив при этом качество моделей на высоком уровне. *Результаты.* В результате проведенного исследования разработаны модели нейронных сетей, с помощью которых возможно идентифицировать высокорисковые кредитные организации. *Выводы.* Разработка новых математических моделей, методов и алгоритмов для анализа деятельности кредитных организаций позволит своевременно реагировать на возможные риски экономической безопасности страны и прогнозировать финансовое состояние отдельных ее звеньев.

Ключевые слова: Банк России, кредитные организации, нейросеть, корреляционный анализ, метод главных компонент

Для цитирования: Иванов В. В., Акишина Е. П., Приказчикова А. С. Разработка математических моделей для анализа состояния кредитных организаций на основе искусственных нейронных сетей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 98–107. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-8

MATHEMATICAL MODELS DEVELOPMENT FOR CREDIT ORGANIZATIONS STATE ANALYSIS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

V.V. Ivanov¹, E.P. Akishina², A.S. Prikazchikova³

^{1, 2} Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia

³ Federal Service for Financial Monitoring, Moscow, Russia

¹ ivanov@jinr.ru, ² eakishina@mail.ru, ³ aska4.92@mail.ru

Abstract. *Background.* The subject of this study is the development and optimization of mathematical models for analyzing the financial condition of credit institutions based on artificial neural networks. The relevance of the study is due to the need to introduce modern

computing technologies, with the use of which the Bank of Russia will be able to preventively respond to possible risks in the banking sector. *Materials and methods.* Within the framework of the study, a new approach to analyzing and evaluating the activities of credit institutions based on artificial neural networks was developed. The analysis of the composition of indicators was carried out using the matrix of Pearson correlation coefficients and the principal component method. The authors managed to reduce the sample size fed to the input of the neural network, while maintaining the quality of the models at a high level. *Results.* As a result of the study, neural network models were developed that can be used to identify high-risk credit institutions. *Conclusions.* The development of new mathematical models, methods and algorithms for analyzing the activities of credit institutions will allow a timely response to possible risks to the country's economic security, as well as forecasting the financial condition of its individual links.

Keywords: Bank of Russia, credit institutions, neural network, correlation analysis, principal component analysis

For citation: Ivanov V.V., Akishina E.P., Prikazchikova A.S. Mathematical models development for credit organizations state analysis based on artificial neural networks. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):98–107. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-8

Введение

Важнейшим условием обеспечения национальной безопасности любой страны является стабильность ее экономической системы. Одним из основных звеньев такой системы являются кредитные организации. В целях превентивного реагирования на возможные риски в банковской сфере представляется целесообразным провести работы по развитию новых моделей для оценки и прогнозирования финансового состояния той или иной организации.

Ранее авторами рассматривалась практическая задача идентификации высокорисковых кредитных организаций с использованием многомерного статистического анализа [1]. По результатам проведенных исследований была разработана вычислительная схема, позволившая обеспечить прогнозирование попадания кредитных организаций в зону риска. В работе [2] предложен новый подход к оценке финансовой безопасности кредитных организаций. Методом главных компонент найден интегральный показатель, значения которого соответствуют индексу вовлеченности кредитных организаций в отмыwanie доходов. В статье [3] проведен анализ причин отзывов лицензий у российских банков, а также представлен перечень факторов, сопутствующих повышению или понижению вероятности отзыва лицензий по той или иной причине. Однако все перечисленные решения не позволяют выявлять нелинейные связи, которые присущи реальным экономическим явлениям, в связи с чем возникает необходимость в переходе к более сложным нелинейным методам обработки данных – нейронным сетям.

За последние несколько лет на основе нейронных сетей были разработаны многочисленные модели, позволяющие оценить и спрогнозировать микро- и макроэкономические показатели. Так, авторами работы [4] была разработана нейронная сеть для оценки финансового состояния компаний реального сектора экономики. Исследования [5] посвящены вопросам проектирования архитектур нейронных сетей, решающих задачу кредитного скоринга. В работе [6] представлены результаты прогнозирования российской инфляции при помощи нейронных сетей и метода опорных векторов.

Целью настоящей работы является развитие новых математических моделей для анализа финансового состояния кредитных организаций. Для достижения указанной цели авторами была поставлена задача проведения классификации организаций с помощью современных технологий математического моделирования – искусственных нейронных сетей (ИНС). В качестве объекта исследования выбрано финансовое состояние кредитных организаций, а также показатели их деятельности из стандартной формы банковской отчетности № 101. Выборка данных информационной системы СПАРК [7] содержала 23 показателя о 536 организациях, из которых 202 – неблагонадежные – организации с отозванной лицензией. Для неблагонадежных организаций показатели брались за три месяца до даты отзыва у них лицензии, для благонадежных организаций (действующих на сегодняшний день) использовались данные на 31 января 2019 г. Используемые показатели:

1. Население региона регистрации банка.
2. Уставный капитал.
3. Чистые активы.
4. Счета в Банке России.
5. Коррсчета (НОСТРО).
6. Ценные бумаги.
7. Кредиты (общий показатель).
8. Кредиты организациям.
9. Средства организаций на расчетных счетах.
10. Вклады физических лиц.
11. Векселя.
12. Капитал.
13. Кредиты физическим лицам.
14. Кредиты другим банкам (МБК).
15. Основные средства.
16. Учтенные векселя.
17. Прибыль (убыток) до налогообложения.
18. Коррсчета (ЛОРО).
19. Кредиты других банков.
20. Средства клиентов (физлица).
21. Депозиты юридических лиц.
22. Облигации.
23. Резервы на возможные потери.

Применение нейронной сети к исходным данным

Искусственные нейронные сети широко и успешно применяются во многих задачах науки, техники, экономики и бизнеса, связанных с анализом и обработкой данных. Первым шагом построения модели нейронной сети является определение ее архитектуры. В текущей задаче в качестве модели ИНС использовался многослойный перцептрон (МСП). В теории одного скрытого слоя в МСП достаточно для аппроксимации любой непрерывной функции. Однако на практике для аппроксимации таких сложных данных, как в нашем случае, лучший результат дает МСП с двумя скрытыми слоями. Анализируемые данные подаются на входные нейроны, число этих нейронов определяется объемом исходной выборки. На вход сети подавалась выборка, включающая

23 показателя финансовой деятельности кредитных организаций. Число нейронов скрытых слоев подбиралось исходя из результатов обучения сети с помощью алгоритма обратного распространения ошибок.

В ходе вычислительного эксперимента в Python [8], который проводился с использованием популярных библиотек машинного обучения TensorFlow [9] и Keras [10], рассматривались модели нейронных сетей типа Sequential – линейный стек слоев, где каждый слой следует за предыдущим. Предварительно для улучшения результатов работы нейронной сети исходные данные были стандартизированы. Анализировались модели с разным количеством скрытых слоев, количеством нейронов на них. На всех слоях, кроме последнего, использовалась активационная функция – ReLU, которая работает по принципу: если входное значение x положительное, функция возвращает это значение, а если x отрицательное, то функция возвращает 0. На последнем слое нейронной сети использовалась активационная функция – сигмоида, которая применяется для решения задач бинарной классификации, где требуется получить вероятности принадлежности к одному из классов. Кроме того, авторами были протестированы нейронные сети с использованием разных методов оптимизации, представленных в библиотеке Keras. В качестве функции потерь выбрана функция бинарной кросс-энтропии, широко используемая для задач бинарной классификации.

Для решения проблемы переобучения в нейронных сетях применялся метод dropout («метод прореживания», «метод исключения») [11]. Метод позволяет создавать модели ИНС посредством исключения из сети нейронов с вероятностью p . Исключенные нейроны не вносят свой вклад в процесс обучения ни на одном из этапов алгоритма обратного распространения ошибки и возвращают на выходе 0.

Анализ результатов исследования показал, что архитектура ИНС вида 23-20-10-1 (23 входных нейрона, 20 и 10 нейронов в скрытых слоях и 1 выходной нейрон) при выборе метода оптимизации Adam и скорости обучения, равной 0,001, дает максимальную точность модели – 79 %. Указанная точность классификации Ассигасу рассчитывалась по формуле

$$\text{Assurasy} = \frac{K}{G}, \quad (1)$$

где K – количество правильно классифицированных объектов; G – общее количество объектов в выборке [12].

Применение нейронной сети к некоррелированным данным

Известно, что явление мультиколлинеарности негативно влияет на значения параметров моделей машинного обучения. Для исследования исходных данных была сформирована матрица коэффициентов корреляций Пирсона [13], которая позволяет установить наличие линейной зависимости переменных. Анализ матрицы выявил сильную связь отдельных показателей (коэффициент корреляции более 0,8); такие показатели были исключены из дальнейшего рассмотрения. На основе отобранных показателей («Население региона», «Уставный капитал», «Коррсчета (НОСТРО)», «Кредиты», «Учтенные векселя», «Прибыль до налогообложения», «Коррсчета (ЛОРО)», «Кредиты других банков», «Средства клиентов», «Капитал», «Счета в Банке России», «Ценные бумаги») была построена модель ИНС с точностью 77 % при выборе архитектуры 12-10-5-1 и метода оптимизации Adam.

Применение нейронных сетей к главным компонентам

Следующим этапом настоящего исследования стало применение метода главных компонент (МГК) к данным о кредитных организациях для последующего использования результатов МГК в моделях ИНС. МГК – это метод уменьшения размерности, что достигается путем линейного преобразования исходных данных в новую систему координат, которую образуют главные компоненты, таким образом, чтобы можно было установить направления, отражающие наибольшее изменение данных [14].

В результате применения МГК к 23 исходным показателям сгенерированы 23 главные компоненты. Анализ вклада компонент в общую дисперсию показал, что наибольший вклад дает первая главная компонента, а начиная с 12 компоненты вклад остальных незначителен, исходя из чего использовались первые 12 главных компонент, совокупная дисперсия которых составила 95 %. Анализ нейронной сети, построенной на первых 12 главных компонентах, показал наивысшую точность модели ИНС 76 % при выборе архитектуры 12-10-5-1 и метода оптимизации RMSprop.

Показатели качества модели нейронной сети

Для оценки качества классификации рассмотрим метрики Precision, Recall, F1, AUC (2-5) [12]. Для этих целей используем матрицу ошибок (табл. 1) [15], где TP – количество верноположительных результатов, TN – количество верноотрицательных результатов, FP – количество ложноположительных результатов, FN – количество ложноотрицательных результатов.

Таблица 1

Матрица ошибок классификации кредитных организаций

		Фактические данные	
		Надежный банк	Неблагонадежный банк
Прогнозные данные	Надежный банк	TP	FP
	Неблагонадежный банк	FN	TN

Имеем

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (2)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

$$F1 = \frac{2}{\frac{1}{\text{Recall}} + \frac{1}{\text{Precision}}} = 2 \frac{\text{Recall} \cdot \text{Precision}}{\text{Recall} + \text{Precision}} = \frac{TP}{TP + \frac{FP + FN}{2}}, \quad (4)$$

$$\text{AUC} = \frac{1 + \text{Recall} - \frac{FP}{TN + FP}}{2}, \quad (5)$$

где Precision – точность или доля правильно классифицированных объектов класса А/Б среди всех наблюдений, отнесенных алгоритмом к классу А/Б; Recall – полнота или оценка способности алгоритма распознать объекты класса А/Б, где класс А – класс благонадежных организаций, класс Б – класс неблагонадежных организаций; $F1$ – среднее гармоническое пары Precision-Recall; AUC – метрика, которая позволяет оценить эффективность модели бинарной классификации одной величиной – площадью под ROC-кривой [2].

Результаты

Рассмотрим полученные результаты классификации кредитных организаций с использованием моделей ИНС. В табл. 2–4 представлены матрицы ошибок для моделей ИНС на исходных данных, на некоррелированных показателях и на главных компонентах соответственно.

Таблица 2

Матрица ошибок модели ИНС на исходных данных

	Надежный	Неблагонадежный
Надежный	293	41
Неблагонадежный	74	128

Таблица 3

Матрица ошибок модели ИНС на некоррелированных данных

	Надежный	Неблагонадежный
Надежный	288	45
Неблагонадежный	77	126

Таблица 4

Матрица ошибок модели ИНС на главных компонентах

	Надежный	Неблагонадежный
Надежный	287	46
Неблагонадежный	80	123

В табл. 5 представлены значения метрик качества моделей нейронной сети для разных типов данных, где «0» – класс благонадежных объектов, «1» – класс неблагонадежных объектов.

Таблица 5

Метрики качества моделей ИНС

Метрика качества	Модель нейронной сети					
	на исходных данных		на некоррелированных показателях		на главных компонентах	
	0	1	0	1	0	1
Precision	80 %	77 %	72 %	68 %	75 %	72 %
Recall	89 %	62 %	82 %	68 %	79 %	61 %
F1-мера	84 %	69 %	77 %	69 %	78 %	69 %
AUC	86 %		77 %		74 %	
Accuracy	79 %		77 %		76 %	

Из табл. 5 видно, что полученные модели имеют высокие значения метрик качества, а значит, могут быть применены для решения практических задач и использоваться для финансового мониторинга кредитных организаций.

На рис. 2–4 представлены графики динамики показателя точности построенных моделей нейронной сети на каждой эпохе (всего 100 эпох) для обучающей и тестовой выборок.

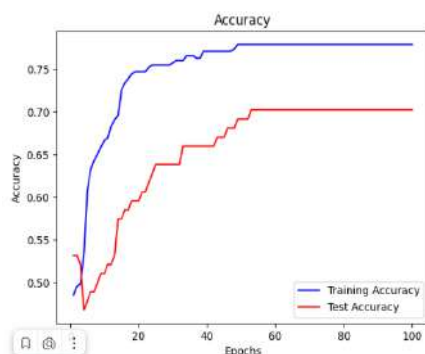


Рис. 2. Динамика показателя точности модели ИНС на исходных данных

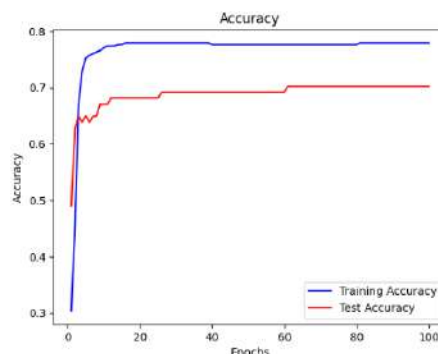


Рис. 3. Динамика показателя точности модели ИНС на некоррелированных показателях

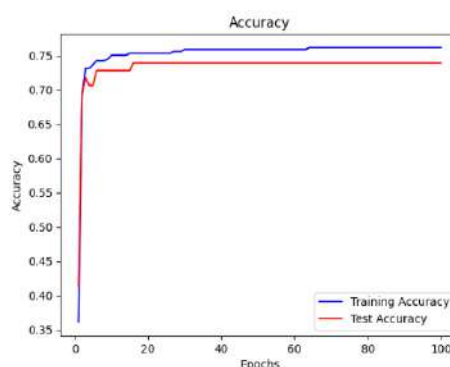


Рис. 4. Динамика показателя точности модели ИНС на главных компонентах

Обсуждение

В работе [2] автор использовал модель двухклассовой нейронной сети для решения задачи обнаружения банков, вовлеченных в отмывание денежных средств. При этом метрики качества полученной модели анализа данных оказались следующими: Accuracy = 78 %, AUC = 89 %.

Для разработанной нами модели ИНС, построенной на исходных данных, Accuracy = 79 %, AUC = 86 %. Однако важно, что автор работы [2] на этапе формирования обучающей выборки рассматривал только одну причину отзыва банковской лицензии, в отличие от текущей работы, где авторы задействовали весь спектр причин. Таким образом, результаты, полученные в настоящей статье, обладают более весомой практической значимостью и полнотой исследования по сравнению с результатами, приведенными в работе [2].

Заключение

Авторами развит новый подход для анализа финансового состояния кредитных организаций на основе искусственных нейронных сетей, а также произведена оценка качества моделей ИНС, реализованных на различных типах данных (исходные данные, данные после применения к ним корреляционного анализа, данные после применения к ним метода главных компонент). Точность модели ИНС, построенной на исходных данных, составила 79 %; для некоррелированных показателей – 77 %; для главных компонент – 76 %. Исходя из вышесказанного, можно заключить, что разработанные модели ИНС целесообразно применять для идентификации высокорисковых кредитных организаций.

Отметим также, что с использованием корреляционного анализа и метода главных компонент авторам удалось уменьшить количество анализируемых показателей формы банковской отчетности № 101. В свою очередь, это дает возможность существенно сократить объемы информации для хранения в базах данных Банка России и Росфинмониторинга, задействовать меньше ресурсов и оборудования, повысить работоспособность и оперативность информационных систем контролирующих ведомств России.

Список литературы

1. Акишина Е. П., Иванов В. В., Крянев А. В., Приказчикова А. С. Многомерный анализ данных в задаче прогнозирования попадания кредитных организаций в зону риска // Вестник НИЯУ МИФИ. 2024. № 13 (1). С. 22–29. doi: 10.26583/vestnik.2024.302 EDN: HUDHFW
2. Бекетнова Ю. М. Методология анализа данных в сфере противодействия отмыванию доходов : дис. ... д-ра эконом. наук. М., 2022. 305 с.
3. Зубарев А. В., Шилов К. Д. Дифференциация факторов банковских дефолтов по причинам отзыва лицензий // Экономический журнал ВШЭ. 2022. № 26 (1). С. 69–103.
4. Болотов Р. О., Суглобов А. Е. О применении нейронных сетей для оценки финансовой устойчивости компаний // Russian journal of management. 2020. № 1 (8). С. 106–110.
5. Кадиев А. Д., Чибисова А. В. Нейросетевые методы решения задачи кредитного скоринга // Математическое моделирование и численные методы. 2022. № 4 (36). С. 81–92.
6. Павлов Е. Прогнозирование инфляции в России с помощью нейронных сетей // Деньги и кредит. 2020. № 1. С. 57–73.
7. СПАРК-Интерфакс : официальный сайт. URL: <https://group.interfax.ru> (дата обращения: 31.07.2024).
8. Python. URL: <https://www.python.org> (дата обращения: 19.03.2024).
9. TensorFlow. URL: <https://www.tensorflow.org/?hl=ru> (дата обращения: 21.03.2024).
10. Keras. URL: <https://keras.io> (дата обращения: 21.03.2024).
11. Molchanov D., Ashukha A., Vetrov D. Variational dropout sparsifies deep neural networks // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning, ICML. 2017.
12. Tharwat A. Classification assessment methods // Applied Computing and Informatics. 2020. Vol. 17, iss. 1. P. 30.
13. Coscia M. Pearson correlations on complex networks // Journal of Complex Networks. 2021. Vol. 9 (6).
14. Андрукович П. Ф. Некоторые свойства метода главных компонент. Многомерный статистический анализ в социально-экономических исследованиях. М. : Наука, 1974. 228 с.

15. Паклин Н. Б., Орешков В. И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям : учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб. : Питер, 2013. 704 с.

References

1. Akishina E.P., Ivanov V.V., Kryanev A.V., Prikazchikova A.S. Multidimensional data analysis in predicting credit institutions' exposure to risk. *Vestnik NIYaU MIFI = Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI*. 2024;(13):22–29. (In Russ.). doi: 10.26583/vestnik.2024.302 EDN: HUDHFW
2. Beketnova Yu.M. *Methodology of data analysis in the field of combating money laundering*. DSc dissertation. Moscow, 2022:305. (In Russ.)
3. Zubarev A.V., Shilov K.D. Differentiation of bank default factors due to license revocation. *Ekonomicheskiy zhurnal VShE = Economic Journal of the Higher School of Economics*. 2022;(26):69–103. (In Russ.)
4. Bolotov R.O., Suglobov A.E. On the use of neural networks to assess the financial stability of companies. *Russian journal of management = Russian journal of management*. 2020;(1):106–110. (In Russ.)
5. Kadiev A.D., Chibisova A.V. Neural network methods for solving the problem of credit scoring. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody = Mathematical modeling and numerical methods*. 2022;(4):81–92. (In Russ.)
6. Pavlov E. Forecasting inflation in Russia using neural networks. *Den'gi i kredit = Money and Credit*. 2020;(1):57–73. (In Russ.)
7. *SPARK-Interfaks: ofitsial'nyy sayt = SPARK-Interfax : official website*. (In Russ.). Available at: <https://group.interfax.ru> (accessed 31.07.2024).
8. *Python*. Available at: <https://www.python.org> (accessed 19.03.2024).
9. *TensorFlow*. Available at: <https://www.tensorflow.org/?hl=ru> (accessed 21.03.2024).
10. *Keras*. Available at: <https://keras.io> (accessed 21.03.2024).
11. Molchanov D., Ashukha A., Vetrov D. Variational dropout sparsifies deep neural networks. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning, ICML*. 2017.
12. Tharwat A. Classification assessment methods. *Applied Computing and Informatics*. 2020;17(1):30.
13. Coscia M. Pearson correlations on complex networks. *Journal of Complex Networks*. 2021;9(6).
14. Andrukovich P.F. *Nekotorye svoystva metoda glavnykh komponent. Mnogomernyy statisticheskiy analiz v sotsial'no-ekonomicheskikh issledovaniyakh = Some properties of the principal component method. Multidimensional statistical analysis in socio-economic research*. Moscow: Nauka, 1974:228. (In Russ.)
15. Paklin N.B., Oreshkov V.I. *Biznes-analitika: ot dannyykh k znaniyam: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. = Business analytics: from data to knowledge : a textbook. 2nd ed., rev.* Saint Petersburg: Piter, 2013:704. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Владимирович Иванов
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
лаборатории информационных
технологий имени М. Г. Мещерякова,
Объединенный институт ядерных
исследований
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, 6)
E-mail: ivanov@jinr.ru

Victor V. Ivanov
Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, chief researcher
of Laboratory of Information
Technologies named after
M.G. Meshcheryakov,
Joint Institute for Nuclear Research
(6 Joliot-Curie street, Dubna, Moscow
region, Russia)

Елена Павловна Акишина

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории информационных
технологий имени М. Г. Мещерякова,
Объединенный институт ядерных
исследований
(Россия, Московская обл., г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, 6)
E-mail: eakishina@mail.ru

Elena P. Akishina

Candidate of physical and mathematical
sciences, senior researcher
of Laboratory of Information
Technologies named after
M.G. Meshcheryakov,
Joint Institute for Nuclear Research
(6 Joliot-Curie street, Dubna, Moscow
region, Russia)

Анастасия Сергеевна Приказчикова

консультант Управления развития
информационных технологий
финансового мониторинга,
Федеральная служба по финансовому
мониторингу
(Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, 39, стр. 1)
E-mail: aska4.92@mail.ru

Anastasia S. Prikazchikova

Consultant of Department of Information
Technologies Development of Financial
Monitoring,
Federal Service for Financial Monitoring
(build. 1, 39 Myasnitskaya street,
Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 06.09.2024

Поступила после рецензирования/Revised 14.11.2024

Принята к публикации/Accepted 17.12.2024

СВЕРТОЧНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ

Л. Ю. Кривоногов¹, С. Ф. Левин²,
И. С. Иномбоев³, Д. В. Папшев⁴

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹leonidkrivonogov@yandex.ru, ²lvln.stanislav.01@mail.ru,

³ilhomdzoninomboev@gmail.com, ⁴rover_d@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается разработка нейросетевого классификатора электрокардиосигналов (ЭКС). Автоматическая классификация освобождает кардиологов от трудоемкой и однообразной работы, сокращает время интерпретации электрокардиограмм. Целью исследования является разработка и оценка качества модели сверточной нейронной сети для автоматической классификации ЭКС в 12 стандартных отведениях для выявления наиболее распространенных и опасных состояний сердечно-сосудистой системы. *Материалы и методы.* Выбраны и обоснованы группы заболеваний для классификации. Предложена оригинальная модификация архитектуры сверточной нейронной сети 1D ResNet34. В качестве данных для обучения и тестирования модели были использованы ЭКГ-записи из общедоступной китайской базы физиологических сигналов CPSC Database. Обучение и оценка качества модели были реализованы методом 10-кратной кросс-валидации. *Результаты.* Оценка качества классификации электрокардиосигналов была проведена при помощи стандартных метрик. Средние значения точности (accuracy), меры F1 и AUC-ROC разработанного классификатора составляют 0,964, 0,832 и 0,975 соответственно. *Выводы.* Качество классификации электрокардиосигналов разработанной моделью соответствует мировому уровню и практически не уступает врачебному. Разработанный классификатор может быть интегрирован в различные системы электрокардиографической диагностики.

Ключевые слова: электрокардиография, классификация электрокардиосигналов, глубокое обучение, сверточные нейронные сети

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 24-25-00404 от 29.12.2023 (URL: <https://rscf.ru/project/24-25-00404>).

Для цитирования: Кривоногов Л. Ю., Левин С. Ф., Иномбоев И. С., Папшев Д. В. Сверточная нейронная сеть для классификации электрокардиосигналов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 108–121. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-9

A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR ECG SIGNALS CLASSIFICATION

L.Yu. Krivonogov¹, S.F. Levin²,
I.S. Inomboev³, D.V. Papshev⁴

^{1, 2, 3, 4} Penza State University, Penza, Russia

¹leonidkrivonogov@yandex.ru, ²lvln.stanislav.01@mail.ru,

³ilhomdzoninomboev@gmail.com, ⁴rover_d@mail.ru

Abstract. *Background.* The article is devoted to the development of a neural network for ECG signals classification. Automatic classification of ECG signals frees cardiologists from laborious and monotonous work and reduces the time of ECG interpretation. The aim of the study is to create and evaluate a convolutional neural network model for automatic ECG signals classification in 12 standard leads to identify the most common and dangerous cardiovascular diseases. *Materials and methods.* Groups of diseases for classification were selected and substantiated. An original, modified architecture of the 1D ResNet34 convolutional neural network was proposed. ECG recordings from the publicly available Chinese CPSC Database were used to train and test the model. The training and evaluation of the model's performance were carried out using the 10-fold cross-validation method. *Results.* The performance of ECG signal classification was evaluated using standard metrics. The average values of accuracy, F1 score, and AUC-ROC for the developed classifier are 0.964, 0.832, and 0.975, respectively. *Conclusions.* The performance of the model corresponds to the world level of the best global achievements and is comparable to the expert-medical level. The developed ECG signal classifier can be integrated into various electrocardiographic diagnostic systems.

Keywords: electrocardiography, ECG signal classification, deep learning, convolutional neural networks

Financing: the work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant № 24-25-00404 dated December 29, 2023 (URL: <https://rscf.ru/project/24-25-00404>).

For citation: Krivonogov L.Yu., Levin S.F., Inomboev I.S., Papshev D.V. A convolutional neural network for ECG signals classification. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):108–121. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-9

Введение

Электрокардиография – широко распространенный, недорогой и абсолютно безопасный метод исследования сердца, позволяющий выявлять целый ряд опасных и угрожающих жизни состояний. С середины прошлого века предпринимаются попытки автоматизации электрокардиографических исследований. В первую очередь исследователей интересовала автоматическая интерпретация (классификация, расшифровка, анализ) электрокардиосигналов (ЭКС). Эта проблема чрезвычайно сложная, в полной мере она не решена до сих пор. В ее основе лежит биологическая природа ЭКС. Исследуемые электрокардиосигналы отличаются значительным разнообразием, высокой изменчивостью, непредсказуемостью, отсутствием явных границ между отдельными элементами. Кроме того, при регистрации ЭКС неизбежно присутствуют помехи различного вида и происхождения, искажающие и маскирующие диагностические признаки [1].

Первые алгоритмы автоматической интерпретации ЭКС либо формализовывали опыт традиционного врачебного ЭКГ-исследования, либо решали достаточно простые статистические задачи. В 1970–1980-е гг. были разработаны достаточно эффективные алгоритмы автоматической интерпретации/классификации ЭКС на основе выделения амплитудно-временных и частотных признаков, продукционных правил и деревьев решений. Такие детерминированные «жесткие» алгоритмы не всегда способны достаточно достоверно классифицировать сигналы физиологического происхождения. Даже

небольшое повышение качества подобных алгоритмов требует многократного увеличения их вычислительной сложности.

Еще в середине 1970-х гг. были сформулированы основные цели автоматизации электрокардиографических исследований [2], которые остаются актуальными и сегодня:

- освобождение врачей от трудоемкой и рутинной работы: измерения амплитудно-временных параметров ЭКС, подсчета различных элементов и диагностических фактов, формирования синдромальных заключений;
- сокращение материальных затрат, повышение производительности труда медицинского персонала;
- сокращение времени расшифровки ЭКС;
- применение современных математических и статистических методов, в принципе не реализуемых при «ручном» исследовании;
- использование признаков, не применяемых при «ручном» исследовании ЭКС из-за трудоемкости и сложности расчетов, несмотря на их высокую информативность;
- освобождение процесса принятия решения от субъективизма в трактовке получаемых результатов;
- возможность создавать архивы, базы данных, передавать ЭКС и результаты анализа по различным каналам связи.

Единственным способом сделать достижения мирового уровня в области электрокардиографии достоянием практического здравоохранения является массовое применение программных средств автоматической интерпретации ЭКС. При этом программные интерпретаторы ЭКС должны иметь высокую достоверность – на уровне экспертной группы врачей-кардиологов.

В настоящее время для интерпретации/классификации ЭКС широко используются методы машинного обучения, позволяющие создавать гибкие и эффективные алгоритмы. Авторами статьи был проведен обзор научных публикаций (начиная с 2018 г.), посвященных разработке методов и моделей для классификации ЭКС с применением различных технологий машинного обучения. Анализ публикаций [3–15] позволил сравнить значения метрик качества классификации, полученных при реализации различных проектов, и определить:

- перспективные технологии машинного обучения, применяемые для классификации ЭКС;
- базы ЭКГ-данных, используемые для обучения;
- количество и номенклатуру сформированных классов;
- количество и состав ЭКГ-отведений;
- количество и длительность эпизодов для обучения.

Основные результаты обзора были сведены в табл. 1.

В таблице для каждого из проектов приведена информация о применяемых базах данных, количестве ЭКГ-эпизодов для обучения и количестве классов, используемых в технологиях машинного обучения, а также значения метрик качества классификации. Все это позволяет получить определенное представление о современном уровне исследований в области автоматической классификации ЭКС.

Таблица 1

Основные технические решения и значения метрик качества автоматической классификации ЭКС

Авторы, год публикации, ссылка на источник	База данных/ Количество ЭКГ-эпизодов/ Количество классов	Используемые технологии	Значения метрик качества классификации				F1 Score
			Accuracy	Precision	Specificity	Sensitivity/ Recall	
Sannino G., De Pietro G., 2018 [3]	[16]/4576/2	DNN	0,99	–	0,986	0,995	–
Mena L. J. [et al.], 2018 [4]	[16]/8000/2	FFNN	0,97	–	0,966	1,00	–
Качаева Г. И., Мустафаев А. Г., 2018 [5]	[16]/458/5	MLP	–	–	0,89	0,71	–
Raghunath S. [et al.], 2019 [6]	Авторская/ 1 775 926/30	DNN	0,68	–	0,64	0,88	–
Hannun A.Y. [et al.], 2019 [7]	Авторская/ 91 232/12	1D CNN	–	0,85	0,97	0,83	0,83
Москаленко В. А. [и др.], 2019 [8]	Авторская/1652/9	SVM, DTC	0,629...0,951	–	0,629...0,951	0,667...1	0,81
Tseng L. [et al.], 2020 [9]	[16]/81/8	CWT, 2D CNN	0,97	–	–	0,99	–
Zhao Y. [et al.], 2020 [10]	[16]/8528/4	CWT, 2D CNN	0,871	–	–	–	0,865
Wu M. [et al.], 2021 [11]	[16]/48/5	1D CNN	0,97	0,97	0,99	0,97	–
Солиман Х., Сали С., 2023 [12]	[16]/549/9	CWT, 2D CNN (AlexNET)	0,837	0,727	–	–	0,71
Zhou F., Fang D., 2024 [13]	[16]/48/5	2D CNN	0,996	–	0,91	–	0,92
Eleyan A., Alboghbaish E., 2024 [14]	[16]/11790/5	FFT, CNN	0,976	–	–	–	–
Zhou F, Wang J. [et al.], 2024 [15]	[16]/1400/5	STFT, CNN	0,995	–	0,999	0,992	–

В подавляющем большинстве проектов применялись нейронные сети глубокого обучения (Deep Neural Network, DNN) и чаще всего сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), которые показали достаточно высокое качество классификации. Лишь в некоторых работах использованы другие технологии машинного обучения: нейронные сети прямого пространства (Feed-Forward Neural Network, FFNN), многослойный персептрон (MultiLayer Perceptron, MLP), метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM), классификация на основе дерева решений (Decision Tree Classifiers, DTC). В исследованиях [9, 10, 12, 14, 15] ЭКС с помощью преобразований Фурье (Fast Fourier Transform, FFT; Short-Time Fourier Transform, STFT) или непрерывного вейвлет-преобразования (Continuous Wavelet Transform, CWT) трансформируются в изображения, которые затем классифицируются сверточной нейронной сетью. Эффективность подобного подхода трудно оценить из-за многообразия и неоднозначности выбора вариантов преобразования сигналов в изображения. Кроме того, такое преобразование значительно увеличивает вычислительные затраты.

CNN – это разновидность глубоких многослойных нейронных сетей прямого распространения, наиболее эффективных для распознавания изображений. Основой таких сетей являются сверточные слои, обеспечивающие извлечение признаков из входных данных за счет операции свертки (конволюции) с множеством ядер различных фильтров. Кроме сверточных слоев CNN содержит слои объединения (pooling), уменьшающие размерность данных при сохранении важных признаков, и полностью связанные слои, обеспечивающие классификацию на основе извлеченных признаков.

1D CNN предназначены для обработки одномерных данных и способны автоматически извлекать признаки из сложных сигналов, таких как ЭКС. Они имеют модифицируемую архитектуру, которую можно настраивать под конкретные задачи и типы входных данных. Для обучения 1D CNN требуется большой объем качественно размеченных сигналов.

Целями исследования являются разработка и оценка качества модели сверточной нейронной сети для автоматической классификации 30-секундных записей ЭКС в 12 стандартных отведениях для выявления наиболее распространенных и опасных состояний сердечно-сосудистой системы.

Выбор и обоснование классов

Среди сердечно-сосудистых заболеваний широкое распространение имеет ишемическая болезнь сердца, а также различные нарушения сердечного ритма и проводимости [17, 18]. Данные группы заболеваний составляют более четверти всех госпитализаций кардиологических отделений и возникают не только у людей с патологиями, но и у большинства здоровых людей с тенденцией к развитию острых процессов. Именно они существенно повышают риск сердечно-сосудистых осложнений, вплоть до внезапной смерти, приводят к снижению качества жизни и инвалидности [17, 19].

На основании проведенного обзора и статистических данных, приведенных в [17–19], для реализации сверточной нейронной сети были выбраны девять классов: депрессия/элевация ST-сегмента (STD/STE), фибрилляция предсердий (AF), атриовентрикулярная блокада 1-й степени (I-AVB), блокады

левой/правой ножки пучка Гиса (LBBB/RBBB), преждевременное сокращение предсердий/желудочков (PAC/PVC) и нормальный синусовый ритм (NSR).

Разработка архитектуры нейронной сети для классификации ЭКС

Архитектура нейросетевого классификатора ЭКС была реализована как модификация архитектуры 1D ResNet34, которая является разновидностью сети ResNet, адаптированной для работы с одномерными данными [20].

Основой архитектуры ResNet (Residual Network) являются «остаточные» блоки (residual blocks), обеспечивающие обходное соединение быстрого доступа (identity shortcut connection) между входом и выходом слоя, что позволяет сети преодолевать проблему исчезающих градиентов при обучении методом обратного распространения ошибки. Соединение быстрого доступа не усложняет архитектуру сети и позволяет обучать чрезвычайно глубокие сети. Таким образом, архитектура ResNet позволяет относительно легко повышать качество классификации за счет увеличения глубины (количества слоев) [20].

При разработке нейросетевого классификатора ЭКС модель 1D ResNet34 была усовершенствована следующим образом (рис. 1).

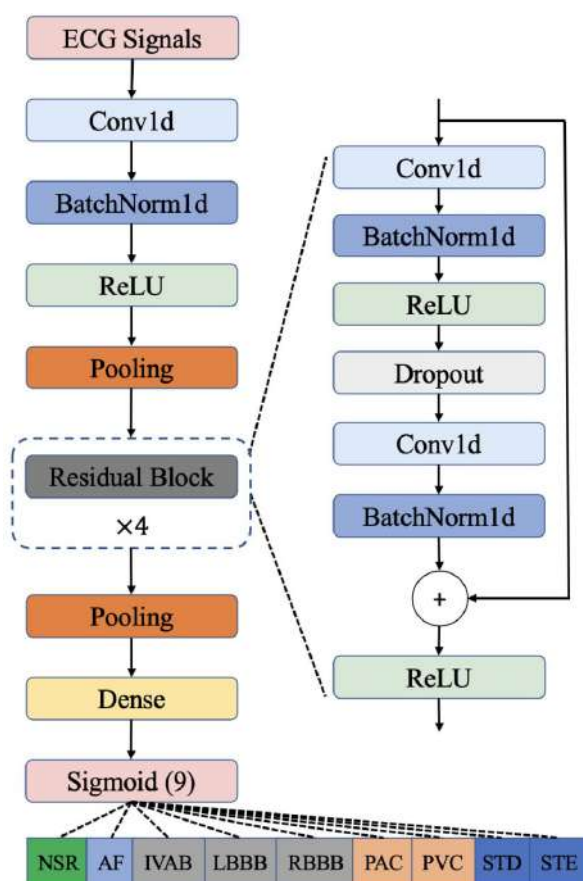


Рис. 1. Архитектура нейросетевого классификатора ЭКС

При сохранении количества слоев (34) был изменен порядок входных сверточных (Conv1d) и субдискретизирующих (Max Pool) слоев. До перехода

сигнала в остаточный блок (Residual Block) чередующиеся восемь слоев урезаны до четырех и теперь включают в себя последовательно располагающиеся слои: сверточный (Conv1d), пакетной нормализации (BatchNorm1d), линейной активации (ReLU) и субдискретизирующий (Max Pool). Для извлечения значимых признаков и максимизации общей эффективности модели во время обучения принято решение использовать четыре семислойных остаточных блока с соединениями быстрого доступа.

В итоге остаточные блоки (Residual Blocks) содержат восемь сверточных слоев (Conv1d), восемь слоев пакетной нормализации (BatchNorm1d), четыре слоя Dropout (функции предотвращения переобучения) и восемь слоев ReLU (нелинейной функции активации).

После прохождения через остаточные блоки извлеченные признаки объединяются (процесс адаптивного максимального объединения) для выделения наиболее важной информации. Объединенные результаты передаются на полносвязный выходной слой (Dense) и сигмоидную функцию активации (Sigmoid).

На вход классификатора подаются 30-секундные записи ЭКС с частотой дискретизации 500 отс/с в 12 отведениях ($30 \times 500 \times 12 = 180\,000$ отсчетов), результат классификации – выбор одного из девяти классов.

Описание используемых данных для обучения и тестирования

В качестве данных для обучения и тестирования моделей машинного обучения для классификации ЭКС [3–15] чаще всего используют ЭКГ-записи различных баз данных ресурса PhysioNet [16]: Normal Sinus Rhythm RR Interval Database, MIT-BIH Arrhythmia Database, PTB Diagnostic ECG Database, Sudden Cardiac Death Holter Database и др. Их применение при создании классификатора ЭКС нецелесообразно по следующим причинам. Базы данных ресурса PhysioNet созданы в разное время (с 1970-х гг. по настоящее время), содержат ЭКГ-записи, зарегистрированные в разном количестве отведений (2, 12, 15) и оцифрованные с различными параметрами (частота дискретизации от 128 до 1000 отс/с, 11–16 разрядов квантования). Каждая из этих баз данных содержит десятки, реже сотни ЭКГ-записей, а для эффективного обучения CNN нужны тысячи обучающих примеров, поэтому одной базы данных явно недостаточно, а объединение нескольких разноформатных баз не всегда корректно.

На сегодняшний день при создании проектов в области классификации ЭКС целесообразно использовать общедоступные ЭКГ-данные различных конкурсных интернет-платформ по исследованию данных. Примерами таких онлайн-платформ являются kaggle.com от Google [21] и The China Physiological Signal Challenge (CPSC) 2018 [22]. Для обучения и тестирования разрабатываемой модели были использованы ЭКГ-записи базы физиологических сигналов CPSC Database, созданной в рамках проведения первого китайского конкурса по анализу физиологических сигналов. CPSC Database – база с открытым исходным кодом, что позволяет использовать ее для создания различных проектов в области автоматической классификации ЭКС. CPSC Database содержит 9831 ЭКГ-записей в 12 отведениях от 9458 пациентов (4655 женщин и 5176 мужчин). Частота дискретизации записей ЭКГ составляет 500 отс/с, длительность – от 6 до 60 с. Все данные представлены в формате .mat, с полной аннотацией и временными метками. Классы по аннотации соответствуют ранее

выбранным классам. Все записи были предварительно нормализованы для обеспечения стабильности работы модели.

Обучение модели

Обучение и оценка качества модели были реализованы методом 10-кратной кросс-валидации [23], который обеспечивает учет вариабельности данных и предотвращает переобучение модели. ЭКС базы CPSC были случайным образом разделены на десять приблизительно равных непересекающихся частей. В каждом раунде восемь из десяти частей использовались для обучения, одна часть – для валидации и одна часть – для тестирования. Метрики качества классификации рассчитывались для каждого из десяти раундов, а затем усреднялись. Подобный подход позволил получить более достоверную оценку качества модели [23].

Пороговые значения для каждого класса выбирались исходя из максимального значения меры F1, тем самым обеспечивая сбалансированное уменьшение ложноотрицательных и ложноположительных ошибок классификации. Обучение классификатора было остановлено на 39-й эпохе.

Конфигурация компьютера, использованного для создания и обучения модели:

- процессор Intel Core i3-10100 (4 ядра, 8 потоков, базовая частота 3,6 ГГц, максимальная частота до 4,3 ГГц);
- видеокарта NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti (2 ГБ GDDR5);
- оперативная память 8 ГБ DDR4 (2666 МГц);
- HDD 500 ГБ;
- операционная система Windows 10.

Для ускорения обучения использовался графический процессор GPU. Разработка и обучение модели были реализованы в среде разработки Visual Studio Code (VSCode), которая предоставляет удобные инструменты для работы с кодом и обеспечивает интеграцию с различными библиотеками (включая TensorFlow и PyTorch) и фреймворками. VSCode поддерживает расширения для Python, что значительно упрощает работу с библиотеками для глубокого обучения, а также предоставляет возможности для отладки, автодополнения и организации рабочего процесса. Для создания и управления изолированными виртуальными средами использованы средства пакета Miniconda.

Результаты и обсуждение

Качество разработанной нейросетевой модели для классификации ЭКС было оценено посредством матриц ошибок (рис. 2) и стандартных метрик качества [24] (Accuracy, Precision, Recall, F1-score, AUC-ROC) по каждому из девяти классов. Кроме того, были получены усредненные по классам значения метрик (табл. 2).

Средние значения метрик AUC-ROC и Accuracy разработанного классификатора ЭКС превысили 0,96, а среднее значение меры F1 составило 0,832. Мера F1 является важнейшей метрикой в задачах классификации, когда необходим баланс между Precision и Recall (т.е. одинаково важно минимизировать ложноотрицательные и ложноположительные ошибки классификации). Мера F1 является средним гармоническим между Precision и Recall и традиционно

используется в качестве основной метрики при оценке качества классификации медицинских диагностических моделей.

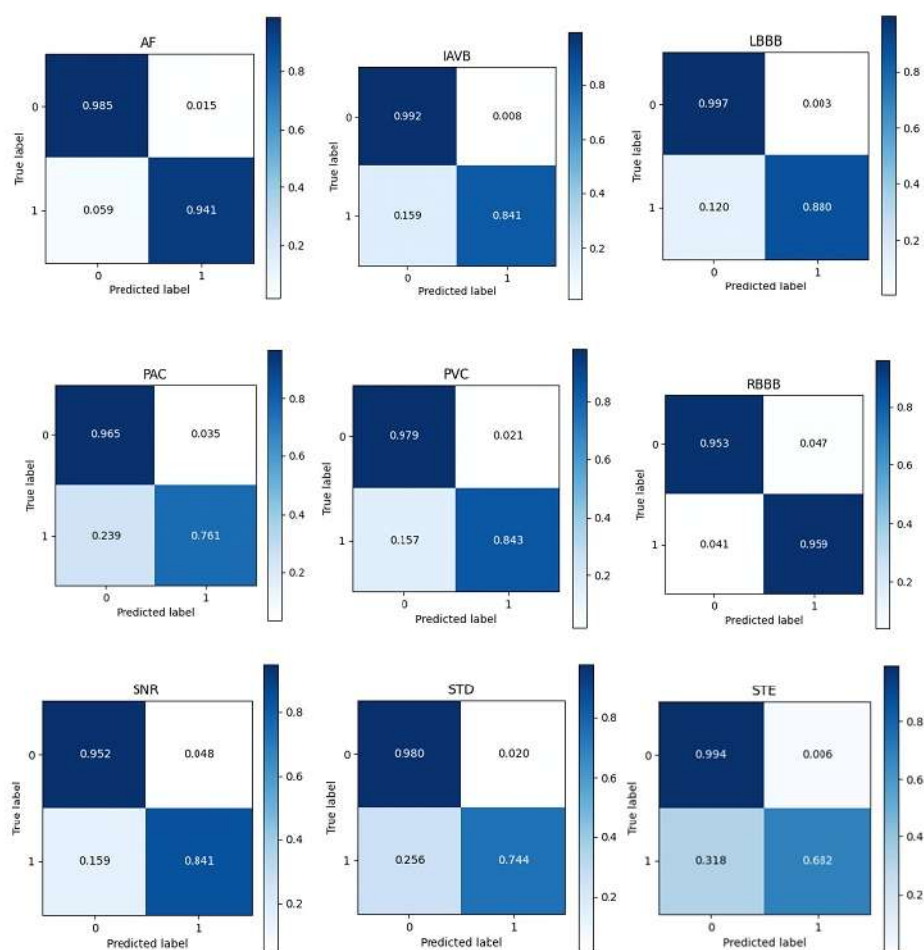


Рис. 2. Матрицы ошибок по каждому из классов

Таблица 2

Метрики качества классификации ЭКС

Класс	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	AUC-ROC
SNR	0,937	0,718	0,841	0,775	0,968
AF	0,978	0,914	0,941	0,928	0,991
IAVB	0,974	0,932	0,841	0,885	0,978
LBBB	0,993	0,917	0,880	0,898	0,975
RBBB	0,955	0,889	0,959	0,923	0,985
PAC	0,945	0,699	0,761	0,729	0,962
PVC	0,965	0,819	0,843	0,831	0,980
STD	0,949	0,848	0,744	0,793	0,963
STE	0,984	0,789	0,682	0,732	0,980
Усредненное по классам	0,964	0,836	0,832	0,832	0,975

Разработанная модель показала наилучшие результаты в классификации фибрилляции предсердий (класс AF) и блокады правой ножки пучка Гиса (класс RBBB) со значением меры F1 более 0,9. Однако значение меры F1 для классов STE и STD (элевация и депрессия сегмента ST) недостаточно высоко и составляет 0,732 и 0,793 соответственно. Кроме того, у модели возникают некоторые проблемы с классификацией PAC (преждевременное сокращение предсердий) и SNR (нормальный синусовый ритм). Эти же выводы можно сделать при изучении матриц ошибок для классов SNR, PAC, STD и STE, на которых видны достаточно большие значения ложноотрицательных результатов. Такие ошибки могут быть связаны с различиями в диагностике (и, соответственно, в разметке) этих классов врачами разных больниц.

Заключение

Сравнение разработанной модели с результатами других исследований в этой области демонстрирует высокое качество классификации ЭКС – на уровне лучших достижений. Если же сопоставлять проекты, обученные на одинаковых данных, то показательным будет сравнение с результатами участников конкурса China Physiological Signal Challenge 2018 [22]. Лишь один проект, занявший первое место, превышает разработанную модель по значению усредненной меры $F1 = 0,837$.

Исходя из различных метрик качества врачебной ЭКГ-диагностики, приведенных в статьях [7, 8], можно говорить о том, что качество классификации ЭКС разработанной моделью сопоставимо с врачебным (во всяком случае, по некоторым классам). При этом время классификации 30-секундной записи ЭКГ в 12 отведениях составляет менее 1 секунды, что значительно превышает способности любого врача-кардиолога.

По результатам разработки сверточной нейронной сети для классификации ЭКС получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [25].

Созданный классификатор ЭКС может быть применен в системах автоматической диагностики сердечно-сосудистых патологий, анализирующих электрокардиограммах, АРМ врача-кардиолога, медицинских интернет-сервисах. Примером подобного интернет-кардиосервиса является веб-приложение CardioAI, в которое интегрирован созданный классификатор. Приложение CardioAI разработано авторами статьи и размещено по адресу cardioai.istj.su. Веб-приложение позволяет вводить данные о пациенте, загружать mat-файлы ЭКГ (длительностью 30 с в 12 отведениях, с частотой дискретизации 500 отс/с, объемом не более 5Мб), обеспечивает их классификацию и выдачу компьютерного заключения.

Список литературы

1. Кривоногов Л. Ю. Система электрокардиографической диагностики критических состояний в условиях свободной активности пациента : дис. ... д-ра. техн. наук. Пенза, 2017. 412 с.
2. Чирейкин Л. В., Шурыгин Д. Я., Лабути В. К. Автоматический анализ электрокардиограмм. Л. : Наука, 1977. 248 с.
3. Sannino G., De Pietro G. A deep learning approach for ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection // Future Generation Computer Systems. 2018. Vol. 86.

- P. 446–455. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X17324548?via%3Dihub> (дата обращения: 12.08.2024).
4. Mena L. J., Félix V. G., Ochoa A. [et al]. Mobile personal health monitoring for automated classification of electrocardiogram signals in elderly // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2018. Vol. 2018. P. 1–9. URL: <https://www.hindawi.com/journals/cmmm/2018/9128054/> (дата обращения: 12.08.2024).
5. Качаева Г. И., Мустафаев А. Г. Использование нейросетевых методов для автоматического анализа электрокардиограмм при диагностике заболеваний сердечно-сосудистой системы // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2018. № 45 (2). С. 114–124.
6. Raghunath S., Cerna A. E. U., Jing L. [et al]. Deep neural networks can predict mortality from 12-lead electrocardiogram voltage data. doi: 10.48550/arXiv.1904.07032
7. Hannun A. Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M. [et al]. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network // *Nature Medicine*. 2019. Vol. 25, № 1. P. 65–69.
8. Москаленко В. А., Никольский А.В., Золотых Н. Ю. [и др.] Программный комплекс «Киберсердце-диагностика» для автоматического анализа электрокардиограмм с применением методов машинного обучения // *Современные технологии в медицине*. 2019. Т. 11, № 2. С. 86–91.
9. Tseng L., Tseng V. Predicting Ventricular Fibrillation Through Deep Learning. 2020. Vol. 8. P. 20. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9284455> (дата обращения: 12.08.2024).
10. Zhao Y., Cheng J., Zhang P., Peng X. ECG Classification Using Deep CNN Improved by Wavelet Transform // *Computers, Materials & Continua*. 2020. Vol. 64, № 3. P. 1615–1628. doi: 10.32604/cmc.2020.09938
11. Wu M., Lu Y., Yang W. A Study on Arrhythmia via ECG Signal Classification Using the Convolutional Neural Network // *Front Comput. Neurosci*. 2021. Vol. 14. P. 10. URL: https://www.researchgate.net/publication/348249676_A_Study_on_Arrhythmia_via_ECG_Signal_Classification_Using_the_Convolutional_Neural_Network (дата обращения: 12.08.2024).
12. Солиман Х., Сали С. Классификация аритмий с использованием предварительно обученной модели глубокого обучения с бинарными изображениями сегментированной ЭКГ // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2023. Т. 26, № 2. С. 120–127.
13. Zhou F., Fang D. Multimodal ECG heartbeat classification method based on a convolutional neural network embedded with FCA // *Sci Rep*. 2024. Vol. 14. P. 8804. doi: 10.1038/s41598-024-59311-0
14. Eleyan A., Alboghbaish E. Electrocardiogram Signals Classification Using Deep-Learning-Based Incorporated Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory Framework // *Computers*. 2024. Vol. 13. С. 55. doi: 10.3390/computers13020055
15. Zhou F., Wang J. Heartbeat classification method combining multi-branch convolutional neural networks and transformer // *iScience*. 2024. Vol. 27. P. 109307. doi: 10.1016/j.isci.2024.109307
16. The Research Resource for Complex Physiologic Signals. URL: <https://physionet.org> (дата обращения: 12.08.2024).
17. Беленков Ю. Н., Терновой С. К. Функциональная диагностика сердечно-сосудистых заболеваний. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2017. 976 с.
18. Моисеева В. С., Мартынова А. И., Мухина Н. А. Внутренние болезни : учебник : в 2 т. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2012. Т. 1. 590 с.
19. Затонская Е. В., Матюшин Г. В., Гоголашвили Н. Г. [и др.]. Эпидемиология аритмий (обзор данных литературы) // *Сибирское медицинское обозрение*. 2016. № 3. С. 5–16.

20. He K., Zhang X., Ren S. [et al]. Deep Residual Learning for Image Recognition. doi: 10.48550/arXiv.1512.03385
21. Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com>
22. The China Physiological Signal Challenge 2018. URL: <http://2018.icbeb.org/Challenge.html> (дата обращения: 25.06.2024).
23. Lyashenko V., Jha A. Cross-Validation in Machine Learning: How to Do It Right. URL: <https://neptune.ai/blog/author/vladimirlyashenko> (дата обращения: 12.08.2024).
24. Bajaj A. Performance Metrics in Machine Learning [Complete Guide]. URL: <https://neptune.ai/blog/performance-metrics-in-machine-learning-complete-guide> (дата обращения: 12.08.2024).
25. Свидетельство № 2046604262 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа классификации электрокардиосигналов на основе сверточной нейронной сети / Кривоногов Л. Ю., Левин С. Ф., Иномбоев И. С. ; зарег. в реестре программ для ЭВМ 07.05.2024.

References

1. Krivonogov L.Yu. *The system of electrocardiographic diagnosis of critical conditions in conditions of free activity of the patient*. DSc dissertation. Penza, 2017:412. (In Russ.)
2. Chireykin L.V., Shurygin D.Ya., Labutin V.K. *Avtomaticheskiy analiz elektrokardiogram = Automatic analysis of electrocardiograms*. Leningrad: Nauka, 1977:248. (In Russ.)
3. Sannino G., De Pietro G. A deep learning approach for ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection. *Future Generation Computer Systems*. 2018;86:446–455. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X17324548?via%3Dihub> (accessed 12.08.2024).
4. Mena L.J., Félix V.G., Ochoa A. et al. Mobile personal health monitoring for automated classification of electrocardiogram signals in elderly. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2018;2018:1–9. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/cmmm/2018/9128054/> (accessed 12.08.2024).
5. Kachaeva G.I., Mustafaev A.G. The use of neural network methods for automatic analysis of electrocardiograms in the diagnosis of diseases of the cardiovascular system. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2018;(45):114–124. (In Russ.)
6. Raghunath S., Cerna A.E.U., Jing L. et al. *Deep neural networks can predict mortality from 12-lead electrocardiogram voltage data*. doi: 10.48550/arXiv.1904.07032
7. Hannun A.Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M. et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nature Medicine*. 2019;25(1):65–69.
8. Moskalenko V.A., Nikol'skiy A.V., Zolotykh N. Yu. et al. The Cybercardiogram Diagnostics software package for automatic analysis of electrocardiograms using machine learning methods. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern technologies in medicine*. 2019;11(2):86–91. (In Russ.)
9. Tseng L., Tseng V. *Predicting Ventricular Fibrillation Through Deep Learning*. 2020;8:20. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9284455> (accessed 12.08.2024).
10. Zhao Y., Cheng J., Zhang P., Peng X. ECG Classification Using Deep CNN Improved by Wavelet Transform. *Computers, Materials & Continua*. 2020;64(3):1615–1628. doi: 10.32604/cmc.2020.09938
11. Wu M., Lu Y., Yang W. A Study on Arrhythmia via ECG Signal Classification Using the Convolutional Neural Network. *Front Comput. Neurosci*. 2021;14:10. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348249676_A_

- Study_on_Arrhythmia_via_ECG_Signal_Classification_Using_the_Convolutional_Neural_Network (accessed 12.08.2024).
12. Soliman Kh., Sali S. Classification of arrhythmias using a pre-trained deep learning model with binary images of segmented ECG. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika = Proceedings of Russian universities. Radio electronics*. 2023;26(2):120–127. (In Russ.)
 13. Zhou F., Fang D. Multimodal ECG heartbeat classification method based on a convolutional neural network embedded with FCA. *Sci Rep*. 2024;14:8804. doi: 10.1038/s41598-024-59311-0
 14. Eleyan A., Alboghbaish E. Electrocardiogram Signals Classification Using Deep-Learning-Based Incorporated Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory Framework. *Computers*. 2024;13:55. doi: 10.3390/computers13020055
 15. Zhou F., Wang J. Heartbeat classification method combining multi-branch convolutional neural networks and transformer. *iScience*. 2024;27:109307. doi: 10.1016/j.isci.2024.109307
 16. *The Research Resource for Complex Physiologic Signals*. Available at: <https://physionet.org> (accessed 12.08.2024).
 17. Belenkov Yu.N., Ternovoy S.K. *Funktsional'naya diagnostika serdechno-sosudistyykh zabolevaniy = Functional diagnostics of cardiovascular diseases*. Moscow: GEOTAR-Media, 2017:976. (In Russ.)
 18. Moiseeva V.S., Martynova A.I., Mukhina N.A. *Vnutrennie bolezni: uchebnik: v 2 t. = Internal diseases : textbook : in 2 volumes*. Moscow: GEOTAR-Media, 2012;1:590. (In Russ.)
 19. Zatonskaya E.V., Matyushin G.V., Gogolashvili N.G. et al. Epidemiology of arrhythmias (review of literature data). *Sibirskoe meditsinskoe obozrenie = Siberian Medical Review*. 2016;(3):5–16. (In Russ.)
 20. He K., Zhang X., Ren S. et al. *Deep Residual Learning for Image Recognition*. doi: 10.48550/arXiv.1512.03385
 21. *Kaggle*. Available at: <https://www.kaggle.com>
 22. *The China Physiological Signal Challenge 2018*. Available at: <http://2018.icbeb.org/Challenge.html> (accessed 25.06.2024).
 23. Lyashenko V., Jha A. *Cross-Validation in Machine Learning: How to Do It Right*. Available at: <https://neptune.ai/blog/author/vladimirlyashenko> (accessed 12.08.2024).
 24. Bajaj A. *Performance Metrics in Machine Learning [Complete Guide]*. Available at: <https://neptune.ai/blog/performance-metrics-in-machine-learning-complete-guide> (accessed 12.08.2024).
 25. *Svidetel'stvo № 2046604262 o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Programma klassifikatsii elektrokardiosignalov na osnove svertochnoy neyronnoy seti = Certificate No. 2046604262 on state registration of a computer program. A program for classifying electrocardiosignals based on a convolutional neural network*. Krivonogov L.Yu., Levin S.F., Inomboev I.S.; reg. in the computer program registry 07.05.2024. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Леонид Юрьевич Кривоногов
 доктор технических наук, доцент,
 профессор кафедры медицинской
 кибернетики и информатики,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: leonidkrivonogov@yandex.ru

Leonid Yu. Krivonogov
 Doctor of technical sciences,
 associate professor,
 professor of the sub-department
 of medical cybernetics
 and computer science,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Станислав Федорович Левин

врач-ординатор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lvin.stanislav.01@mail.ru

Stanislav F. Levin

Resident,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илхомджон Сулхиддинович Иномбоев

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ilhomdzoninomboev@gmail.com

Ihomjon S. Inomboev

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Викторович Папшев

старший преподаватель кафедры
медицинской кибернетики
и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rover_d@mail.ru

Dmitry V. Papshev

Senior lecturer of the sub-department
of medical cybernetics
and computer science,
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 10.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 11.12.2024

Принята к публикации/Accepted 17.12.2024

ОБ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА ОТ МОДЕРНИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ПЕРЕСТРАХОВАНИИ

М. В. Шептунов

Московский государственный лингвистический университет, Москва, Россия
Московский гуманитарный университет, Москва, Россия
triumf403@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При внедрении инноваций существенную роль играет оценка (в том числе сравнительная) рассчитываемого эффекта от модернизации распределенных автоматизированных систем управления (АСУ) рисками, особенно крупными с исходящим перестрахованием в пулах. В связи с этим актуальна разработка усовершенствованного критерия оценки эффекта от модернизации распределенных АСУ рисками в перестраховании и методики проведения системного анализа на основе такого критерия. *Материалы и методы.* Количество заключаемых страховых договоров в год с их дальнейшим исходящим перестрахованием интерпретируется как абсолютная пропускная способность широкого класса разомкнутых систем массового обслуживания (СМО). При этом в формулу годового эффекта от модернизации распределенных АСУ рисками введены две дополнительные составляющие, учитывающие как полноту загрузки каналов СМО (характеризующую простаивание), так и влияние на его итог процентной банковской ставки. *Результаты.* Разработаны две расширенные формулы: главного показателя и критерия качества на его основе – для оцениваемого и сопоставляемого годового эффекта от модернизации распределенных АСУ рисками в перестраховании пулами. Разработана методика проведения системного анализа принимаемых решений, позволяющая со стадии проектирования АСУ обнаруживать и отсекалть либо обходить неблагоприятные ситуации обращения в ноль этого эффекта. *Выводы.* Важна в ракурсе годового эффекта и охватывающего его системного анализа: роль не только величин организационно-технических параметров проектируемых и эксплуатируемых АСУ рисками в перестраховании, но и соотношений параметров брутто-ставки и страхового взноса с учетом и коэффициента загрузки каналов СМО, и процентной банковской ставки.

Ключевые слова: страхование, автоматизация, документооборот, методика, системный анализ, массовое обслуживание

Благодарности: выражаю слова благодарности в адрес руководства Финансового университета, где была начата данная работа, Российского государственного гуманитарного университета, в котором исследование было продолжено, Московского государственного лингвистического университета и Московского гуманитарного университета за стимулирование научной деятельности, а также анонимного рецензента за полезные замечания по улучшению статьи.

Для цитирования: Шептунов М. В. Об усовершенствовании критерия оценки эффекта от модернизации автоматизированных систем управления рисками в перестраховании // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 122–132. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-10

UPON IMPROVING THE CRITERION OF EVALUATION OF THE EFFECT FROM MODERNIZATION OF AUTOMATED RISK MANAGEMENT SYSTEMS IN REINSURANCE

M.V. Sheptunov

Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia
Moscow University for the Humanities, Moscow, Russia
triumf403@yandex.ru

Abstract. *Background.* At the introducing of innovations the assessment, including comparative, of the calculated effect of modernization of distributed automated risk management systems (ARMS), especially by large risks with outgoing reinsurance in pools, plays an essential role. Therefore, it is relevant to develop: an improved criterion for assessing the effect of modernization of distributed automated ARMS in reinsurance and methods for the system analysis based on such criterion. *Materials and methods.* The number of concluded insurance contracts per year, with their further outgoing reinsurance, is interpreted as the absolute throughput of a wide class of open-loop queuing systems (QS). Herein two additional components have been introduced into the formula for the annual economic effect from the modernization of the distributed ARMS for more realistic, justified and meaningful calculation, taking into account both the completeness of load (characterizing standing idle) of QS channels and the impact of the bank interest rate on its result. *Results.* Two extended formulas have been developed, namely of the main indicator and of the quality criterion on the base of it, for the evaluated and compared annual effect of modernization of distributed ARMS in the reinsurance by the pools. There have also been developed methods of implementing system analysis of the decisions being made, allowing from the stage of the design of the ARMS to detect and cut off or bypass unfavourable situations of the reversal of this effect into zero. *Conclusions.* In the foreshortening of the annual effect and system analysis covering it, the role is important: not only of the values of the organizational and technical parameters of the designed and operated ARMS in the reinsurance, but also of the ratios of the parameters of the gross rate and insurance premium, considering the load factor of the QS channels, and the bank interest rate.

Keywords: insurance, automation, document flow, methods, system analysis, queuing

Acknowledgements: I would like to express my gratitude to the management of the Financial University where this work was started, the Russian State University for the Humanities, where the research was continued, the Moscow State Linguistic University and the Moscow University for the Humanities for stimulating scientific activity, as well as to the anonymous reviewer for useful comments on improving the article.

For citation: Sheptunov M.V. Upon improving the criterion of evaluation of the effect from modernization of automated risk management systems in reinsurance. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):122–132. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-10

Введение

При внедрении инноваций для страховых пулов, распределяющих характерные крупные риски высокостоймостных проектов и процессов, возрастают и требования к тщательности системного анализа воздействующих на принятие решений факторов и параметров, в том числе брутто-ставки, страхового взноса.

Как справедливо отмечается в работе [1], при высоком уровне экономического развития страхование начинает играть роль системы раннего оповещения, поскольку выполняет функции отбора рисков, приемлемых для страхования и перестрахования.

Согласно исследованию [2] приоритетными целями устойчивого развития в РФ являются индустриализация, инновации и инфраструктура. Они взаимосвязаны, а перестрахование подходит для редких катастрофических событий и крупных рисков наподобие рассчитываемых в работе [3] ущербов от пожара объектам строительства и имуществу, а также для массовых рисков видов личного страхования (от несчастного случая, страхование медицинских расходов и др., отличных от накопительного страхования жизни). Не последнюю роль играет оперативное рациональное перестрахование подобных рисков, что четко прослеживается в исследовании [4].

Как известно, одна из подпроблем оценки эффективности или задач сравнительной оценки вариантов (здесь – как способов действий, операций, так и систем) – сопоставление нескольких альтернативных вариантов действий и/или технических средств [5]. Поскольку с позиций системного анализа рекомендуется рассматривать проблему как единую систему и выявлять все последствия и взаимосвязи каждого частного решения, будем придерживаться принятых в теории систем и системном анализе формулировок, подразумевая под соответствием системы своему целевому назначению эффективность системы (в отличие от эффекта – того или иного результата действий), а под правилом для оценки эффективности системы – критерий эффективности.

В качестве критерия эффективности может выступать экстремизация показателей, например максимизация годового экономического эффекта или повышение (максимизация) степени автоматизации документооборота страхования. В данной работе удалось объединить несколько экономических показателей в рамках одной формулы – получилось аналитическое представление интегрального показателя, который и принят за главный. Критерий выражен в устремлении к максимуму упомянутого главного показателя. С учетом одного из определений антропогенной системы – как целенаправленного множества взаимосвязанных элементов *любой природы* – все сказанное относится и к процессу модернизации автоматизированных систем управления (АСУ). Разработанная методика проведения системного анализа принимаемых решений подчеркивает отличия результатов данной работы от исследования [6], где не было ни формирования целевой функции (ныне для расширенного главного показателя), ни пошаговой детализации, охватывающих не только саму АСУ рисками и ее функционирование (эксплуатацию), но и процесс модернизации АСУ. Хотя в статье [6] и были выявлены подлежащие предусмотрительному избеганию неблагоприятные ситуации нулевого экономического эффекта, намечены – однако лишь как «от обратного» (образно) – направления их обхода, показана возможность ухода от них.

Вышесказанное свидетельствует о важной роли совершенствования расчетных и критериальных формул для оценок и системного анализа на основе такого показателя, как годовой экономический эффект от новшеств в перестраховании. Весьма желательно, чтобы критерий рациональности, выражаемый годовым экономическим эффектом от модернизации распределенных АСУ рисками, учитывал особенности последнего, а именно на основе интересующего

эффекта применительно к разомкнутым системам массового обслуживания (СМО) – более широкому классу по сравнению с рассматривавшимися в работе [6] СМО с отказами.

Речь идет о годовом эффекте от модернизации за счет главным образом организационно-технических мероприятий применительно к распределенным АСУ рисками в исходящем перестраховании. Здесь важно выяснить в ракурсе критерия качества указанных систем и взаимосвязанных с ними процессов следующее:

а) возможно ли при значениях среднего страхового взноса и усредненной брутто-ставки (и когда) обращение годового эффекта от упомянутой модернизации в ноль;

б) как избежать подобных ситуаций – с помощью новой (по крайней мере для сферы (пере)страхования) методики проведения системного анализа.

Например, для комплексной автоматизации и оптимизации технологических процессов, прямо не связанных с перестрахованием, известны из работы [7] случаи и условия, когда комплексная автоматизация вообще не даст экономического эффекта. Последнее, как увидим, не исключено и для сферы (пере)страхования рисков.

Речь идет о модернизации, направленной на повышение степени автоматизации документооборота страхования с последующим перестрахованием, как и о совершенствовании его организации в качестве исходящего, управленческого и информационно-технологического процесса в целом. Объемы страховых взносов и выплат для перестрахования пятью (и даже менее) либо более перестраховщиками (особенно когда их в пуле до 10–20) могут быть весьма значительными, процесс для членов пулов будем рассматривать как непрерывный в течение каждого года работы.

Таким образом, нужно иметь формулу, критерий для сопоставления реального эффекта на разных этапах внедрения новаций в автоматизации перестрахования. Критериальная формула должна позволять сравнивать гибридные варианты организации распределенных высокопроизводительных вычислений, обмена данными и прочих операций в ракурсе оперативного рационального (исходящего) перестрахования пулом.

Нет явных противопоказаний к тому, чтобы среди таких улучшений было использование, например, беспроводных телекоммуникационных сетей ДМВ диапазона, модель потока пакетов данных в которых рассматривается в работе [8], и иных.

В исследовании [9] определены критерии выбора экономически эффективного проекта гибких производственных систем (ГПС) с учетом повышения производительности проектируемого предприятия. Разработан алгоритм выбора компоновочной схемы производственного модуля ГПС в ракурсе экономической эффективности.

Нас, однако, интересует именно эффект, а не эффективность, и все-таки не для производственной сферы, а для страховых услуг, но со стадии проектирования АСУ рисками в (пере)страховании. Известные со времен книги [10] и иных почти универсальные формулы экономического эффекта *не* нацелены на специфику перестрахования. С одной стороны, при единственном виде работ (услуг), в качестве которого можно подразумевать исходящее перестрахование, эти формулы предельно упрощаются. С другой стороны, когда за счет

автоматизации и механизации снижается в основном трудоемкость производимых операций (работ, услуг), а перестраховочный процесс (ретроцессия) идет «по цепочке», при длинном ряде перестраховщиков (ретроцедентов) все более существенную роль начинает играть «простаивание» каналов их общей компьютерной сети.

Все вышесказанное свидетельствует об актуальности темы работы.

Стратегическая задача, формализация и решение которой являются целью исследования, двоякая. Во-первых, разработать критерий качества и управления качеством модернизации распределенных АСУ рисками для страховых пулов как организационно-технических систем. Во-вторых, составить методику проведения системного анализа принимаемых решений для страховых пулов как организационно-технических систем управления рисками.

При этом *не* ставится целей и задач сопоставительного анализа экономической эффективности, а не эффекта, от модернизации распределенных АСУ в перестраховании, в ракурсе которой различные составляющие затрат применительно к близким автоматизированным системам обработки информации и управления (АСОИУ) подробно описаны в хорошо известных учебниках [11]. Нас будет интересовать в качестве критерия расширенная формула, которой выражается эффект от модернизации распределенных АСУ рисками в исходящем перестраховании.

Материалы и методы

Абсолютная пропускная способность разомкнутых СМО представляет собой количество заключаемых страховых договоров в год с их исходящим перестрахованием. Следуя работе [6], возможный годовой экономический эффект от совершенствования организации и повышения степени автоматизации процесса страхования с перестрахованием реально рассчитать по формуле, новой как минимум для сферы перестрахования:

$$\mathcal{E}_{г.(исх.перестр.)} = (A_1 - A_0) \cdot \bar{V} + (\bar{T}_{обсл.0} - \bar{T}_{обсл.1}) \cdot \bar{c}_{br} \cdot A_1, \quad (1)$$

где A_1 – количество заключаемых страховых договоров в год (соответствующая абсолютная пропускная способность СМО) при предлагаемом варианте; A_0 – количество заключенных страховых договоров в год (соответствующая абсолютная пропускная способность СМО) при базовом варианте; $\bar{V}$ – средний размер страхового взноса (за год), денежных единиц; $\bar{T}_{обсл.0}$ – среднее время (трудоемкость) обслуживания заявки на страхование с последующим исходящим перестрахованием при базовом варианте; $\bar{T}_{обсл.1}$ – среднее время (трудоемкость) обслуживания заявки на страхование с последующим исходящим перестрахованием при предлагаемом варианте; $\bar{c}_{br}$ – усредненная для вышеуказанного страхования брутто-ставка (обычно с объекта страхования), денежных единиц.

Однако формула из работы [6] более подходит как для предварительного расчета, так и для сравнительной оценки. Отметим также следующие особенности.

Согласно исследованию [12] при «рисковых» видах страхования страховая премия обычно уплачивается единовременным страховым взносом, хотя по

условиям договора страхования стороны могут устанавливать и другое количество взносов.

В ряде случаев для АСУ рисками возникает потребность в изменении дисциплины обслуживания заявок с учетом того, что, например, одна введенная дисциплина (известная как «все как один») улучшает качество обслуживания за счет уменьшения среднего времени пребывания заявки в СМО, но при этом повышает вероятность отказа заявке, снижая относительную и абсолютную пропускную способность СМО. В то же время введение другой дисциплины обслуживания (например, с равномерной взаимопомощью между двумя либо более каналами) действует наоборот и т.д.

Поскольку все более существенную роль начинает играть возможная недогрузка («простаивание») каналов при их обилии в общей компьютерной сети пула, следует учесть для процесса перестрахования полноту загрузки оборудования. В связи с тем, что изменения банковских процентных ставок способны приводить к экономической неравноценности получаемых годовых эффектов, имеет смысл задействовать эту ставку в формуле интересующего эффекта.

Результаты

Разработана как главный показатель *расширенная формула годового экономического эффекта от модернизации распределенных АСУ рисками*:

$$\mathcal{E}_{г.(исх.перестр.)} = \left((A_1 - A_0) \bar{V} + (\bar{T}_{обсл.0} - \bar{T}_{обсл.1}) \bar{c}_{br} A_1 \right) K_3 (1 + r), \quad (2)$$

где $K_3 = \frac{\bar{N}_3}{n}$ – коэффициент загрузки каналов обслуживания при предлагаемом варианте модернизации; r – процентная банковская ставка (применительно к одному году для годового экономического эффекта); $\bar{N}_3 = n - \bar{N}_0$ – среднее число занятых обслуживанием каналов при предлагаемом варианте; n – число каналов обслуживания при предлагаемом варианте; $\bar{N}_0$ – среднее число свободных от обслуживания каналов при предлагаемом варианте.

Таким образом, принимаем во внимание сообразность как можно более полной загрузки каналов обслуживания, а не их простаивания. На основе показателя (2) разработан один из возможных критериев, по существу целевая функция качества функционирования пары «АСУ – клиент», которую следует максимизировать:

$$\mathcal{E}_{г.(исх.перестр.)} = \left((A_1 - A_0) \bar{V} + (\bar{T}_{обсл.0} - \bar{T}_{обсл.1}) \bar{c}_{br} A_1 \right) K_3 (1 + r) \rightarrow \max, \quad (3)$$

причем полагаем величину процентной банковской ставки всегда заданной извне.

Для возможности сопоставления друг с другом различных ситуаций и/или дисциплин обслуживания имеет смысл использовать соответствующее выражение для эффекта как и критерий рациональности, оптимальности, а в качестве него – выражение (3) на основе модифицированной по отношению к формуле из работы [6] расширенной формулы (2) годового экономического эффекта: от совершенствования организации и автоматизации процесса перестрахования.

Рассмотрим небольшой пример, из которого видно, что посредством формулы (2) учитываются отмеченные выше существенные особенности, которые не могут быть учтены формулой (1). Пусть известно: $\bar{T}_{\text{обсл.0}} = 0,01$ года, $\bar{T}_{\text{обсл.1}} = 0,02$ года, $\bar{c}_{br} = 11$ евро; $A_0 = 110$ заявок/год, $A_1 = 410$ заявок/год, $\bar{V} = 15$ евро, $K_3 = 0,6$, $r = 0,1$. Тогда по формуле (1) получается

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{г. (исх. перестр.)}} &= (410 - 110) \cdot 15 + (0,01 - 0,02) \cdot 11 \cdot 410 \approx \\ &\approx 4500 - 45,10 \approx 4454,90 \text{ (евро)}, \end{aligned}$$

в то время как при расчете по формуле (2) имеем более реалистичные цифры:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{г. (исх. перестр.)}} &= ((410 - 110) \cdot 15 + (0,01 - 0,02) \cdot 11 \cdot 410) \cdot 0,6 \cdot 1,1 \approx \\ &\approx 4454,90 \cdot 0,66 \approx 2940,23 \text{ (евро)}, \end{aligned}$$

в данном случае с различием годового эффекта практически в полтора раза.

Рассмотрим также небольшой пример, из которого видно, что формула (2) позволяет даже при максимальном (равном единице) коэффициенте загрузки каналов обслуживания и при 100 %-й банковской ставке дать обнаружить ситуации, когда при некоторых конкретных $\bar{V}$ и $\bar{c}_{br}$ величина $\Theta_{\text{г. (исх. перестр.)}}$ обращается в ноль (с вычислительной точностью). Пусть при прочих равных $\bar{T}_{\text{обсл.0}} = 0,3425945$ года, $\bar{T}_{\text{обсл.1}} = 0,01$ года, $A_0 = 51$ заявка/год, $A_1 = 41$ заявка/год, $K_3 = 1$, $r = 1$. Тогда по формуле (2) $\Theta_{\text{г. (исх. перестр.)}} = 0$, так как

$$((41 - 51) \cdot 15 + (0,3425945 - 0,01) \cdot 11 \cdot 41) \cdot 1 \cdot 2 = 0,$$

т.е. $(-150 + 0,3325945 \cdot 11 \cdot 41) \cdot 2 = 0$ или $(-150 + 150,00012) \cdot 2 = 0$ (с точностью до сотых долей валюты, в которой производится расчет).

Разработана следующая *методика* проведения системного анализа принимаемых решений по модернизации для страховых пулов как организационно-технических систем управления рисками.

Шаг 0. Предварительно на стадии проектирования, создания АСУ рисками в перестраховании руководство организации (либо пула) дает задание на модернизацию АСУ нескольким рабочим группам на альтернативной основе, когда имеется характеризующееся – для каждого имеющегося варианта – повышением оперативности¹ упомянутого процесса страхования непустое множество вариантов модернизации системы $B = \{b_1, \dots, b_k\} \neq \emptyset$ при $k \geq 1$. В ином случае, т.е. если $B = \{b_1, \dots, b_k\} = \emptyset$ при $k = 0$, переход к шагу 5. При $k \geq 3$ выделяют среди возможных соответственно хотя бы 2–3 варианта модернизации АИС, характеризующихся наибольшим их быстродействием.

Шаг 1. Для имеющегося варианта модернизации, назначая представляющие страховой компании и/или пулу экономически оправданными величины

¹ Исходя прежде всего из предполагаемого известным технического быстродействия (по крайней мере известной тактовой частоты процессора) АИС для вариантов их модернизации. Оперативность здесь отлична от эффекта.

финансово-экономических параметров $\bar{V} > 0$ и $\bar{c}_{br} > 0$ при известных значениях исходных организационно-технических характеристик $A_0 > 0$, $\bar{T}_{обсл.0} > 0$ и соответственно измененных¹ A_1 и $\bar{T}_{обсл.1}$ при известных K_3 и r , проверяют по формуле (2), что при таковых $\Theta_{г.(исх. перестр.)} \neq 0$. Если $\Theta_{г.(исх. перестр.)} = 0$ (с точностью до сотых долей валюты, в которой ведется расчет) или $\Theta_{г.(исх. перестр.)} \approx 0$ (с иной заранее задаваемой точностью), то переход к следующему шагу 2, иначе – к шагу 4.

Шаг 2. Исходя из представляющихся экономически оправданными страховой компании и/или пулу пределов изменения величин $\bar{V}$ и $\bar{c}_{br}$, зная все остальные величины в правой части формулы (2), увеличивают и/или уменьшают величины $\bar{V}$ и/или $\bar{c}_{br}$ на значения, определяемые экспертным путем специалистами в данной предметной области, стремясь не только обходить ситуации одновременного кратного повышения величин $\bar{V}$ и $\bar{c}_{br}$, но и к возрастанию величины K_3 в пределах имеющихся возможностей.

Шаг 3. Проверяют, что в результате шага 2 отсутствуют ситуации, когда $\Theta_{г.(исх. перестр.)} = 0$ (с точностью до сотых) или $\Theta_{г.(исх. перестр.)} \approx 0$ (с иной заранее задаваемой точностью). Если имеет место любая из этих двух ситуаций, то переход к шагу 2, иначе – переход к шагу 4.

Шаг 4. Если количество $k > 1$ вариантов модернизации из множества B , то для следующего имеющегося варианта переход к шагу 1, пока не исчерпаны выделенные на шаге 0 хотя бы 2–3 варианта модернизации АИС, характеризующихся наибольшим их быстроедействием из имеющихся k вариантов, иначе переход к шагу 5.

Шаг 5. Завершение.

Обсуждение

Разработанная расширенная формула (2) – аналитическое представление интегрального показателя, принятого за главный, как и критерий (3) на ее основе, могут быть «встроены» в более сложные критерии. Причем критерий (3) является лишь одним из возможных. Вполне могут задаваться известные целевые (плановые) значения интересующего эффекта, тогда его критериальная формула может быть сведена из формы (3) концепции оптимальности к иной форме, например типа строгих либо нестрогих неравенств концепции пригодности, и/или трансформироваться в эффективность.

Различия для годового экономического эффекта практически в полтора раза, как видно из первого примера (при расчете по более ранней формуле (1)

¹ Измененное число заключенных договоров определяют для существующих (обычно не менее 5 лет) пулов или новых. Для существующих предпочтительнее с помощью регрессионного анализа либо иных известных методов прогнозирования на основании динамики числа договоров, для новых – в процессе эксплуатации АСУ; измененное среднее время обслуживания заявки для существующих – либо с помощью известных методов математического прогнозирования, либо экспертным путем специалистами в данной предметной области; для новых – в процессе эксплуатации АСУ и/или экспертным путем.

и по скорректированной формуле (2)), представляются довольно существенными. В связи с этим имеет смысл использовать вторую, усовершенствованную формулу и при оценке реального эффекта от модернизации АСУ рисками в перестраховании, и при оптимизации таких систем сведением ее в критерий (3) (как на стадиях проектирования, эксплуатации, так и на стадии модернизации).

Шаги методики могут рассматриваться как дополнение или продолжение к приведенным примерам применения формулы (2).

Заключение

На основании вышесказанного можно сделать вывод о важности в ракурсе годового экономического эффекта и охватывающего его системного анализа роли не только величин организационно-технических параметров проектируемых и эксплуатируемых АСУ рисками в перестраховании, но и соотношений параметров брутто-ставки и страхового взноса с учетом и коэффициента загрузки каналов СМО, и процентной банковской ставки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан критерий качества и управления качеством модернизации распределенных АСУ рисками для страховых пулов как организационно-технических систем;

- разработана методика проведения системного анализа принимаемых решений по модернизации для страховых пулов как организационно-технических систем управления рисками, пошагово реализованная;

- формализована поставленная задача системного анализа принимаемых решений по модернизации для страховых пулов как организационно-технических систем.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- разработанная методика проведения системного анализа принимаемых решений позволяет обнаруживать и отсекал либо обходить неблагоприятные в отношении нулевого годового эффекта ситуации со стадии проектирования АСУ;

- расширены возможности сравнительной оценки годового эффекта от модернизации распределенных АСУ рисками в перестраховании и его оптимизации благодаря разработанным критерию и методике – при большем количестве составляющих критериальной формулы.

Список литературы

1. Быков А. А., Колесников А. В., Кондратьев-Фирсов В. М. Оценка последствий аварий при страховании опасных объектов : монография / под ред. М. И. Фалеева. М. : ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России, 2013. 396 с.
2. Полтораднева Н. Л., Миль И. К. Российские особенности достижения целей в концепции устойчивого развития // Инновационная экономика и общество. 2022. № 2 (36). С. 33–40.
3. Загуменнова М. В., Порошин А. А., Фирсов А. Г. Методологический подход к определению материального ущерба от пожаров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4. С. 64–79. doi: 10.21685/2227-8486-2021-4-6
4. Шептунов М. В. Страхование и новое научное направление: методы оперативного рационального перестрахования особо серьезного риска на базе эволюционных алгоритмов // Сборник работ победителей национального конкурса научных

- и инновационных работ по теоретической и прикладной экономике. СПб. : Первый класс, 2012. С. 156–167.
5. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. М. : Машиностроение, 1988. 328 с.
6. Шептунов М. В. Анализ распределенной системы оптимизационной модельно-алгоритмической поддержки оперативного перестрахования серьезных рисков с позиции теории массового обслуживания // Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика». 2019. № 1. С. 51–77.
7. Костак Н. Н. Некоторые вопросы теории оптимизации технологических процессов // Автоматика и телемеханика. 1965. Т. 26, вып. 10. С. 1682–1694.
8. Ромашкова О. Н., Самойлов В. Е. Модель потока пакетов данных в беспроводных телекоммуникационных сетях ДМВ диапазона // Технологии информационного общества : сб. трудов XII Междунар. науч.-техн. конф. М. : Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), 2018. Т. 2. С. 231–234.
9. Мамедов Дж. Ф., Абдуллаев Г. С., Коршунов И. Л. [и др.]. Оценка экономической эффективности на этапах проектирования гибких производственных систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021. Т. 18, № 3 (201). С. 26–32.
10. Алферов А. В., Бренер В. С., Качалина Л. Н. [и др.]. Оргтехника в управлении / под общ. ред. Л. Н. Качалиной. М. : Экономика, 1975. 183 с.
11. Хетагуров Я. А. Проектирование автоматизированных систем обработки информации и управления (АСОИУ) : учебник. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 240 с.
12. Страхование от А до Я / под ред. Л. И. Корчевской, К. Е. Турбиной. М. : ИНФРА-М, 1996. 624 с.

References

1. Bykov A.A., Kolesnikov A.V., Kondrat'ev-Firsov V.M. *Otsenka posledstviy avari pri strakhovanii opasnykh ob"ektov: monografiya = Assessment of the consequences of accidents in the insurance of dangerous objects : a monograph*. Moscow: FKU TsSI GZ MChS Rossii, 2013:396. (In Russ.)
2. Poltoradnaya N.L., Mil' I.K. Russian features of achieving goals in the concept of sustainable development. *Innovatsionnaya ekonomika i obshchestvo = Innovative economy and society*. 2022;(2):33–40. (In Russ.)
3. Zagumennova M.V., Poroshin A.A., Firsov A.G. A methodological approach to determining material damage from fires. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(4):64–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2021-4-6
4. Sheptunov M.V. Insurance and a new scientific direction: methods of operational rational reinsurance of particularly serious risk based on evolutionary algorithms. *Sbornik rabot pobediteley natsional'nogo konkursa nauchnykh i innovatsionnykh rabot po teoreticheskoy i prikladnoy ekonomike = Collection of works by the winners of the national competition of scientific and innovative works in theoretical and applied economics*. Saint Petersburg: Pervyy klass, 2012:156–167. (In Russ.)
5. Utkin V.F., Kryuchkov Yu.V. eds.). *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: spravochnik: v 10 t. T. 3. Effektivnost' tekhnicheskikh sistem = Reliability and efficiency in engineering : handbook : in 10 volumes. Vol. 3. Efficiency of technical systems*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:328. (In Russ.)
6. Sheptunov M.V. Analysis of a distributed system of optimization model-algorithmic support for operational reinsurance of serious risks from the perspective of queuing theory. *Vestnik RGGU. Seriya «Informatika. Informatsionnaya bezopasnost'. Matematika» =*

- Bulletin of the Russian State University of Economics. The series "Computer Science. Information security. Mathematics".* 2019;(1):51–77. (In Russ.)
7. Kostake N.N. Some questions of the theory of optimization of technological processes. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemechanics.* 1965;26(10):1682–1694. (In Russ.)
 8. Romashkova O.N., Samoylov V.E. A model of the data packet flow in wireless telecommunication networks of the DMV range. *Tekhnologii informatsionnogo obshchestva: sb. trudov XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Information Society technologies : proceedings of the XII International scientific and technical conference.* Moscow: Moskovskiy tekhnicheskii universitet svyazi i informatiki (MTUSI), 2018;2:231–234. (In Russ.)
 9. Mamedov Dzh.F., Abdullaev G.S., Korshunov I.L. et al. Assessment of economic efficiency at the design stages of flexible production systems. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Bulletin of Computer and Information Technologies.* 2021;18(3):26–32. (In Russ.)
 10. Alferov A.V., Brener V.S., Kachalina L.N. et al. *Orgtekhnika v upravlenii = Office equipment in management.* Moscow: Ekonomika, 1975:183. (In Russ.)
 11. Khetagurov Ya.A. *Proektirovanie avtomatizirovannykh sistem obrabotki informatsii i upravleniya (ASOIU): uchebnik = Design of automated information processing and management systems (ASOIU) : textbook.* Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2015:240. (In Russ.)
 12. Korchevskaya L.I., Turbinaya K.E. (eds.). *Strakhovanie ot A do Ya = Insurance from A to Z.* Moscow: INFRA-M, 1996:624. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Валерьевич Шептунов

кандидат технических наук, доцент,
член Ученого совета
Института информационных наук,
Московский государственный
лингвистический университет
(Россия, г. Москва, ул. Остоженка, 38, стр. 1);
доцент кафедры прикладной
информатики и статистики,
Московский гуманитарный университет
(Россия, г. Москва, ул. Юности, 5)
E-mail: triumph403@yandex.ru

Maxim V. Sheptunov

Candidate of technical sciences,
associate professor,
member of the academic council
of the Institute of Information Sciences,
Moscow State Linguistic University
(building 1, 38 Ostozhenka street,
Moscow, Russia);
associate professor of the sub-department
of applied information and statistics,
Moscow University for the Humanities
(5 Junosty street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 09.11.2023

Поступила после рецензирования/Revised 07.10.2024

Принята к публикации/Accepted 09.10.2024

ПРИНЦИПЫ, МЕХАНИЗМЫ И ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ РИСКОВ И КОРПОРАТИВНЫХ ПРОЦЕДУР

Н. Д. Печалин

Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт
им. академика А. И. Берга, Москва, Россия
npechalin@vk.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Приводится алгоритм определения оптимального управленческого решения при выполнении проекта по изготовлению образца изделия военной техники (ВТ) на предприятии оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Предприятия ОПК в настоящее время представляют сложные организационные системы, задача которых – систематически отвечать на вызовы, которые идут в сторону Российской Федерации на международной арене. Только системный подход может качественно и эффективно подстраиваться и с необходимой скоростью вносить изменения в проекты, которые уже идут или только планируются к реализации. Цель исследования – развитие алгоритма выбора наиболее подходящего управления в тот или иной отрезок времени процесса по изготовлению образца ВТ на одном из предприятий ОПК РФ. *Материалы и методы.* В исследовании использовались принципы обратной связи для определения эффекта от управленческих решений при воздействии на систему. Анализ основных целей проектного управления позволил оценить эффективность взаимосвязи системы и лица, принимающего решения. *Результаты.* Предложен алгоритм и проведена апробация поиска и выбора оптимального управления при воздействии на систему с целью выполнения технологически сложного проекта с ограничениями по ресурсам и времени. *Выводы.* Разработан и опробован методический аппарат, который позволяет решить задачу управления проектом в заданные сроки.

Ключевые слова: управление проектом, система MRP, система ERP, модели управления, механизм управления, проектное управление, процесс принятия решений, экспертные оценки

Для цитирования: Печалин Н. Д. Принципы, механизмы и инструменты управления проектами на предприятиях оборонно-промышленного комплекса в условиях рисков и корпоративных процедур // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 133–148. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-11

PRINCIPLES, MECHANISMS AND PROJECT MANAGEMENT TOOLS AT AGRICULTURAL ENTERPRISES UNDER CONDITIONS OF RISKS AND CORPORATE PROCEDURES

N.D. Pechalin

Central Scientific Research Radio Engineering Institute
named after Academician A.I. Berg, Moscow, Russia
npechalin@vk.com

Abstract. *Background.* The article provides an algorithm for determining the optimal management decision when carrying out a project to manufacture a sample of a military-industrial complex product at an enterprise of the military-industrial complex. Defense industry enterprises currently represent complex organizational systems whose task is to systematically respond to the challenges that are coming towards the Russian Federation in the international arena. Only a systematic approach can adapt efficiently and effectively and make changes with the necessary speed to projects that are already underway or that are just being planned for implementation. As the purpose of the study, the development of an algorithm for choosing the most appropriate control in a given period of time of the process of manufacturing a W sample at one of the enterprises of the defense industry of the Russian Federation. *Materials and methods.* The study used feedback principles to determine the effect of management decisions when influencing the system. The analysis of the main objectives of project management made it possible to assess the effectiveness of the relationship between the system and the decision-maker. *Results.* An algorithm is proposed and an approbation of the search and selection of optimal control when influencing the system is carried out in order to carry out a technologically complex project with limited resources and time. *Conclusions.* A methodological apparatus has been developed and tested, which allows solving the task of project management in a given time frame.

Keywords: project management, MRP system, ERP system, management models, management mechanism, project management, decision-making process, expert assessments

For citation: Pechalin N.D. Principles, mechanisms and project management tools at agricultural enterprises under conditions of risks and corporate procedures. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):133–148. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-11

Введение

При рассмотрении роли предприятий оборонной промышленности в системе обеспечения национальной безопасности государства, а также разноплановости решаемых оборонно-промышленным комплексом (ОПК) задач в экономической системе стоит рассмотреть особенности функционирования предприятий ОПК и выпускаемой ими продукции, отличающие их от товаропроизводителей, действующих в других отраслях экономики.

К таким особенностям можно отнести следующие [1–4]:

1. Наукоемкость и высокотехнологичность разработок и процесса производства большинства современных видов образцов, выпускаемых предприятиями ОПК.
2. Сложность выпускаемой продукции, обуславливающая долгосрочность и капиталоемкость большинства инвестиционных проектов, реализуемых на предприятиях ОПК. Для выпуска конечной продукции – современных видов образцов, выпускаемых предприятиями ОПК – используется значительное число разнообразных материалов, комплектующих, полуфабрикатов, промежуточных изделий.
3. Особые требования к качеству производимой продукции, предъявляемые со стороны государственного заказчика.
4. Уникальность ряда современных видов образцов, выпускаемых предприятиями ОПК, производство которых не имеет аналогов на мировом рынке военной продукции.

5. Широкая номенклатура производимой продукции, характеризующаяся специфическими особенностями производственного процесса, присущими оборонным отраслям промышленности (авиационной, судостроительной, ракетно-космической и др.).

6. Замедленные темпы обновления образцов выпускаемой продукции по сравнению с гражданским сектором экономики в связи с отсутствием необходимости быстрого удовлетворения потребностей рынка.

7. Преобладание монополии со стороны государственного заказчика на создание и производство современных видов образцов, выпускаемых предприятиями ОПК над инициативными работами предприятий ОПК.

8. Особые условия информационного обмена и взаимодействия предприятий ОПК с другими предприятиями и субъектами экономики, связанные с требованиями обеспечения защиты сведений, составляющих государственную тайну.

9. На процесс управления предприятием накладываются некоторые ограничения особенности корпоративных процедур.

В научной литературе существует множество подходов к определению понятия «управление».

Механизмы управления характерны для всех областей человеческой деятельности – военной, технической, экономической и социальной. При этом искусство управления накапливалось в течение всей истории развития человечества, насчитывающей несколько тысячелетий. Принято считать, что начало положило зарождение письменности в древнем Шумере. Важнейшим результатом (связанным с зарождением письменности) стало образование особого слоя «жрецов», которые успешно осуществляли не только религиозные обряды, но и торговые операции. Таким образом, понятие об управлении как способности эффективно применять накопленный опыт на практике сложилось еще в древности. Со временем управление различными видами материального и духовного производства стало самостоятельной профессией, требующей специального образования, опыта и даже склада ума. Однако в самостоятельную область человеческих знаний, т.е. в науку, управление выделилось только в конце XIX в. С этого времени управление рассматривается как наука, которая опирается на исследования в таких областях, как экономика, социология, психология, математика. Управление как научная дисциплина имеет свой предмет изучения, свои специфические проблемы и подходы к их решению. Научную основу этой дисциплины составляет вся сумма знаний об управлении, накопленная за сотни и тысячи лет практики и представленная в виде концепций, теорий, принципов, способов и форм управления.

Раскрыв на рубеже второй половины XX в. общность механизма управления, его научные основы и создав специальные технические средства для интенсификации информационных процессов в контуре управления, человек осуществляет оптимизацию управления в конкретных областях своей деятельности. При этом венцом многовековой эволюции принципа действия механизма управления стало создание такой науки, как кибернетика. Последняя установила общность механизма управления для живой природы, техники, общества и мышления, выявила антиэнтропийную сущность управления, неразрывную связь отражения информации с процессами организации.

При этом подчеркивается, что в механизме управления фундаментальная роль принадлежит принципу обратной связи. Там, где этот принцип нарушается или вообще отсутствует, отсутствуют или искажаются смысл и результаты управления. Принцип обратной связи предполагает в качестве необходимого момента обмен информацией, т.е. осуществляется информационное воздействие объекта управления на его субъект. В обществе этот принцип действует непрерывно, поскольку ответные действия управляемой системы влияют на динамику управленческих актов управляющей системы, постоянно учитывающей поступающую информацию. При этом субъект и объект управления на какое-то время осуществляют ротацию, т.е. субъект управления становится объектом и наоборот. Например, генеральный директор, управляя предприятием, является субъектом управления. Однако действуя на основе информации, получаемой от подчиненных, он уже выступает не только как субъект, но и как объект управления. В свою очередь, объект управления, например начальник цеха, получая то или иное управленческое решение дирекции, в процессе его исполнения действует как субъект управления. Таким образом, субъект и объект управления выполняют двойную функцию – субъектно-объектную. Данные положения служат ключевым фактором в обеспечении плодотворности системного метода в качестве методологической основы теории управления.

В современной литературе управление проектами рассматривается как методология (говорят также искусство) организации, планирования, руководства, координации трудовых, финансовых и материально-технических ресурсов на протяжении проектного цикла, направленная на эффективное достижение его целей путем применения современных методов, техники и технологии управления для достижения определенных в проекте результатов по составу и объему работ, стоимости, времени, качеству и удовлетворению участников проекта.

Материалы и методы

Под проектным управлением подразумевается методика руководства важными и масштабными задачами, которые имеют определенную цель, установленные сроки и ограниченное ресурсное обеспечение. Такой подход позволяет объединить в единое целое постоянные (линейные) процессы, происходящие на предприятии, и целевые (разовые) инициативы.

Научно-технический прогресс, возрастающая сложность реализуемых замыслов, рост конкуренции во всех отраслях, усиление интеграции и взаимодействия производства и науки делают проектное управление актуальным в современном мире. Такой вид управления дает возможность:

- достичь запланированных показателей за счет внедрения таких инициатив, которые будут наиболее выгодны для предприятия в краткосрочном или долгосрочном периоде;
- обеспечить разработку продукта с заранее установленными показателями качества;
- выдержать сроки достижения результата, синхронизировав их с другими работами предприятия;

– эффективно руководить трудовыми, финансовыми, материально-техническими ресурсами.

К основным целям проектного управления можно отнести:

– освоение и внедрение новых видов продукции на основе передовых технологий, которые дадут предприятию конкурентные преимущества на рынке;

– внедрение на предприятии современных управленческих технологий, способных повысить эффективность деятельности на всех уровнях руководства (оперативном, тактическом и стратегическом);

– уменьшение расходов на управленческий аппарат за счет повышения оперативности его работы и сокращения численности;

– материальная мотивация сотрудников за высококачественный труд, ориентированный на результат;

– привлечение инвестиций со стороны за счет внедрения перспективных инициатив;

– концентрация кадровых, научно-технических и производственных ресурсов, рациональная организация работы, как следствие, уменьшение количества времени, затрачиваемого на разработку и производство продукции, и сокращение ее себестоимости.

Анализ этих основополагающих определений позволяет в широком смысле говорить о том, что объект является системой (S), если его можно представить в виде упорядоченной пары множеств: множество соответствующих элементов (A), удовлетворяющих принципам целостности и эмерджентности (эмерджентность – возникновение, появление нового), и множество отношений (R) между этими элементами A , определяющих структуру объекта:

$$S = (A, R). \quad (1)$$

При этом целесообразно принимать во внимание принципы системного подхода, которые учитываются при проектном управлении (табл. 1) [5].

Таблица 1

Принципы системного подхода

Принцип	Суть принципа
Принцип конечной цели	Абсолютный приоритет конечной цели
Принцип единства	Совместное рассмотрение системы как целого и как совокупности элементов
Принцип связности	Рассмотрение любой части совместно с ее связями с окружением
Принцип модульного построения	Полезно выделение модулей в системе и рассмотрение ее как совокупностей модулей
Принцип иерархии	Полезно введение иерархии элементов и/или их ранжирование
Принцип функциональности	Совместное рассмотрение структуры и функции с приоритетом функции над структурой
Принцип развития	Учет изменяемости системы, ее способности к развитию, расширению, замене частей, накоплению информации
Принцип децентрализации	Сочетание в принимаемых решениях и управлении централизации и децентрализации
Принцип неопределенности	Учет неопределенностей и случайностей в системе

Необходимо отметить, что в число основных задач управления производственной кооперацией предприятий ОПК входят следующие:

- обеспечение формирования кооперационной цепочки предприятий, участвующих в выполнении проекта;
- обеспечение процедуры осуществления выбора поставщиков кооперационной цепочки;
- обеспечение эффективного взаимодействия участников кооперационной цепочки;
- повышение эффективности решения задач управления производственным процессом и производственной кооперацией предприятий ОПК;
- обеспечение системы сквозного мониторинга и контроля процесса реализации проекта;
- обеспечение предиктивного анализа предпосылок срывов выполнения проекта.

В качестве инструментов управления проектами на предприятиях ОПК можно рассматривать инструменты, которые позволят:

1. Осуществлять контроль сроков закупок необходимых комплектующих и материалов для производства образцов в нужном количестве.
2. Реализовать синхронизацию работ по производству образцов на всех уровнях кооперации.
3. Осуществлять дискретное согласование объемов и сроков производства между предприятиями ОПК.
4. Получать информацию о наличии резервных производственных мощностей в режиме реального времени.
5. Обеспечивать мониторинг стадий производства образцов с целью управления срывами сроков поставки готовых изделий.
6. Обеспечивать существующий информационный обмен между предприятиями и организациями.
7. Проводить коррекцию конструкторской и технологической документации.
8. Реализовывать мероприятия, направленные на повышение надежности, качества и эффективности образцов и др.

Механизмы реализации этих инструментов определяются научно-методическим аппаратом проектного управления в интересах обеспечения эффективности предприятий в условиях ресурсных, рискованных ограничений и корпоративных процедур с учетом требований по уровню импортонезависимости поставщиков и имеющихся производственных мощностей в условиях санкционного давления, диверсификации промышленности.

Таким образом, решается задача вида: найти такое $u \in U$, для которого

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq X \quad (\text{при этом } W = \max), \quad (2)$$

где i – проект; j – ресурс j -го вида; x – ресурсы проекта; X – ресурсы предприятия; W – эффективность проектов; U – множество допустимых решений.

К решению сформулированной задачи применим метод полного перебора – самый очевидный, но в то же время самый затратный способ решения этой задачи по времени. Решение задачи методом полного перебора предполагает последовательный расчет целевой функции и ограничений для возможных

вариантов из множества допустимых и выбор такого варианта, для которого значение целевой функции максимально, а также выполняются заданные ограничения.

Определение множества перспективных альтернатив

Область компромисса Ω_F^k представляет собой множество образов эффективных решений, которые называют эффективными векторными оценками. Множеству эффективных (Парето-оптимальных) решений Ω_x^k соответствует множество эффективных (Парето-оптимальных) векторных оценок Ω_F^k .

Решения, представляющие интерес для задач векторной оптимизации, находятся в области компромисса Ω_x^k . Оптимальное решение этой задачи в общем случае, не являясь оптимальным одновременно для всех частных показателей (в смысле постановки задачи скалярной оптимизации), должно быть в определенном смысле компромиссным для векторного показателя в целом, поэтому его называют оптимально-компромиссным решением.

Оптимально-компромиссное решение – одно из эффективных решений, которое является предпочтительным с точки зрения лица, принимающего решения (ЛПР) [9–11]. С учетом этого процесс поиска решения задачи векторной оптимизации может быть представлен следующими действиями:

1. Выделение множества эффективных решений, т.е. области компромисса.

2. Выбор среди эффективных решений оптимально-компромиссного решения в соответствии с некоторым условным критерием предпочтения, которое с точки зрения ЛПР является наиболее предпочтительным.

В соответствии с рассмотренными ранее особенностями задачи векторной оптимизации сформулируем ее следующим образом: пусть имеются некоторые объекты выбора x из множества допущенных объектов Ω_x , качество которых оценивается с помощью векторного показателя $F = F(x) = (F_1(x), \dots, F_m(x))$. Требуется найти наиболее предпочтительный объект выбора x^* , т.е. такой объект, который принадлежит множеству допустимых объектов выбора Ω_x и является наилучшим в смысле принятого правила сравнения векторов, называемого правилом (принципом, схемой) компромисса.

При векторной оптимизации возникают проблемы не формального (технические, вычислительные), а концептуального (логические) характера, среди которых проблема выбора принципа оптимальности, определяющего свойства оптимального решения и дающего ответ на главный вопрос – в каком смысле оптимальное решение лучше всех других решений. Наличие этого принципа позволяет получить правило поиска оптимального решения.

В векторных задачах оптимизации частные показатели обычно имеют различную физическую природу и, как следствие, измеряются в различных единицах, т.е. масштабы их несоизмеримы. Следовательно, необходима операция нормирования показателей, под которой понимается приведение показателей к единому безразмерному виду.

Операция нормирования сводится к замене каждого показателя, выраженного в натуральных единицах, его отношением к некоторой нормирующей

величине, измеряемой в тех же единицах, что и сам исходный показатель. В результате такой операции все частные показатели приобретают безразмерный вид.

К нормированию показателей в векторных задачах выбора предъявляются два основных требования:

1. Нормированные показатели должны быть измерены в одних и тех же единицах.

2. В точках оптимума частных показателей x_i^* , $i = 1, \dots, m$ все показатели должны иметь одинаковое значение.

Только при выполнении этих требований можно сравнивать показатели по их численному значению. Существуют различные схемы нормирования.

Частные показатели достаточно часто имеют различную степень важности, что следует учитывать при выборе принципа оптимальности, определении области возможных решений и поиске оптимального решения, отдавая известное предпочтение более важным показателям.

Выделение области компромисса (множества эффективных решений) – первый этап в получении решения задачи векторной оптимизации. Дальнейший поиск решения в области компромисса может быть осуществлен лишь после того, как будет выбрана некоторая схема компромисса.

В ряде случаев выбор схемы компромисса преобразует задачу векторной оптимизации к задаче оптимизации с некоторым единственным скалярным показателем. В итоге выбор того или иного принципа оптимальности сводит задачу векторной оптимизации к эквивалентной (в смысле принятого принципа оптимальности) задаче скалярной оптимизации, которая затем решается на основе очевидного принципа предпочтительности: большему (меньшему) значению скалярного показателя оценивания предпочтительности, полученного при скаляризации исходной задачи, соответствует лучшее решение. Вследствие этого проблему выбора схемы компромисса и соответствующего ей принципа оптимальности можно рассматривать как проблему скаляризации.

Проблема скаляризации – одна из основных концептуальных проблем, которые необходимо решать при поиске оптимального решения, оцениваемого с помощью векторного показателя качества, что объективно целесообразно для любой задачи векторной оптимизации, поскольку допускает реализацию одноцелевых оптимизационных вычислительных схем и позволяет использовать большой арсенал достаточно хорошо разработанных методов математического программирования [8].

Число возможных схем компромисса практически не ограничено. Приведем схемы компромисса, базирующиеся на таких принципах компромисса, как:

1. Принцип обобщенного показателя.
2. Принцип выделения главного показателя.
3. Принцип максимина.
4. Принцип последовательной уступки.
5. Принцип опорной (идеальной) точки.

Идея принципа обобщенного показателя состоит в том, что совокупность частных показателей свертывается (агрегируется) в единый скалярный обобщенный показатель, используемый как мера ценности вариантов решений. Данный показатель можно получить в результате некоторых подходящих операций над набором частных показателей, являющихся компонентами векторного показателя.

Естественное требование к характеру свертывания (агрегирования) частных показателей в обобщенный – требование монотонности связи обобщенного показателя F с исходными частными показателями $F_1, \dots, F_m$, а именно: если вариант x_k имеет более высокие оценки по всем показателям, чем вариант x_ℓ , то и агрегированная оценка F для x_k должна быть выше, чем для x_ℓ . Выполнение требования монотонности позволяет применять максимизацию оценки F в качестве разумного основания для выбора вариантов. В этом случае каждый вариант x , оптимальный по максимуму оценки F , заведомо является Парето-оптимальным по вектору $F = (F_1, \dots, F_m)$ исходных оценок $F_i, i = 1 \dots m$, что и подтверждает корректность такого способа выбора.

Иногда эффективное решение, выбранное в качестве оптимально-компромиссного решения x^* , может быть неудовлетворительным по некоторым частным показателям $F_k(x)$, т.е. при обеспечении максимума функции

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i F_i(x)$$

может оказаться, что какие-то частные показатели качества с недопустимо малыми значениями компенсируются достаточно большими значениями других показателей. Для исключения этого необходимо при постановке задачи оптимизации ввести дополнительные ограничения на неудовлетворительные показатели: $F_k(x) \geq F_k^0$. Тогда определение эффективной точки x^* сводится к решению задачи

$$F^* = F(x^*) = \max_{x \in \Omega_x} \left\{ \sum_{i=1}^m \alpha_i F_i(x) \right\},$$

где $\bar{\Omega}_x = \Omega_x^k \cap \Omega'_x$; $\Omega'_x = \{x : F_k(x) \geq F_k^0, k = 1, \dots, p \leq m\}$.

Принцип выделения главного показателя заключается в том, что из векторного показателя F выделяется один частный показатель F_v – главный показатель, а остальные частные показатели $F_i, i \neq v$ переводятся в ограничения, например, вида $F_i \geq F_i^{\text{зад}}$, где $F_i^{\text{зад}}$ – некоторый минимально допустимый заданный уровень показателя F_i . В результате задача векторной оптимизации сводится к задаче скалярной оптимизации – найти

$$\max_{x \in \Omega_x} F_v(x),$$

где $\bar{\Omega}_x$ – та часть области компромисса Ω_x^k , в которой выполняется условие

$$F_i \geq F_i^{\text{зад}}, i = 1, \dots, m, i \neq v,$$

т.е. $\bar{\Omega}_x = \Omega_x^k \cap \Omega'_x$, $\Omega'_x = \{x : F_i(x) \geq F_i^{\text{зад}}, i = 1, \dots, m, i \neq v\}$.

Результаты

Модель позволяет решить проблему выбора для достижения цели, построив и сравнив альтернативы (варианты) как для одной задачи, так и для множества задач. Критерием оценки выбора служит оптимальное (минимальное, максимальное) значение заданного критерия.

Для примера рассмотрим проект по выполнению опытно-конструкторской работы (ОКР) предприятием ОПК.

Вначале необходимо определить критерии к параметрам на весь отрезок времени, заданный заказчиком по выполнению проекта для оценки эффективности его выполнения.

В качестве исходных данных принимаются тактико-техническое задание (ТТЗ) и время, отведенное на выполнения проекта по поставке изделий, которое в примере составляет девять кварталов.

На основании ТТЗ разрабатывается план-график выполнения ОКР.

Для достижения показателей выполнения проекта, приближенных к плановым, определяются оптимальные варианты управленческих решений для каждого критерия и временного отрезка проекта.

На рис. 1 отображен план выполнения ОКР.

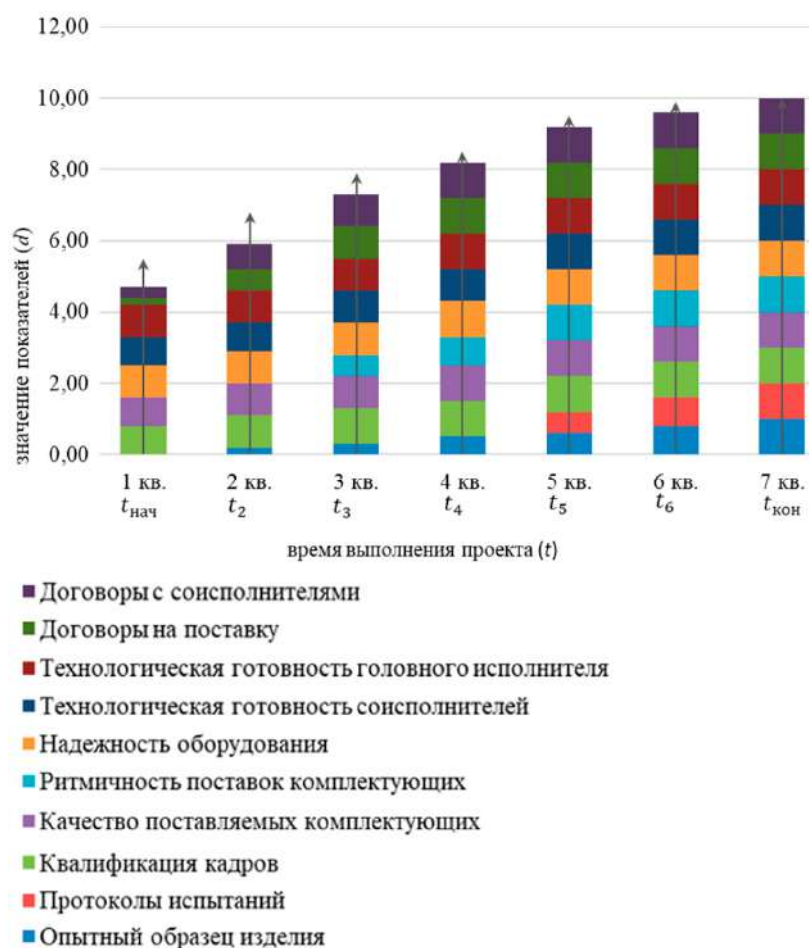


Рис. 1. План выполнения проекта

Управленческие решения:

1. Повышение квалификации работников.
2. Усиление входного контроля поставляемых комплектующих.
3. Ритмичность поставок комплектующих.
4. Замена поставщиков.
5. Модернизация технологического парка соисполнителей.
6. Модернизация технологического парка головного исполнителя.
7. Увеличение численности квалифицированных работников.
8. Увеличение сертифицированных рабочих мест.
9. Ввод сменного графика работы для увеличения рабочего времени.
10. Увеличение интенсивности взаимодействия с заказчиком (совещания, договоренности и т.д.).
11. Увеличение интенсивности взаимодействия с поставщиками (совещания, гарантийные письма).
12. Внесение изменений в конструкторский документ и технологию изготовления опытного образца (ОО) и составной части (СЧ).
13. Привлечение специалистов с других проектов.

Используя эти УП, необходимо построить системы показателей для каждого критерия на каждом из девяти отрезков времени и для каждого этапа.

Ключевые показатели проекта:

1. Опытный образец изделия.
2. Протоколы испытаний.
3. Квалификация кадров.
4. Качество поставляемых комплектующих.
5. Ритмичность поставок комплектующих.
6. Договоры на поставку.
7. Договоры с соисполнителями.
8. Надежность оборудования.
9. Технологическая готовность соисполнителей.
10. Технологическая готовность головного исполнителя.

Критерии:

- стоимость – K1;
- длительность – K2;
- риск – K3;
- финансовая устойчивость – K4;
- технологические ограничения – K5.

Для изготовления опытного образца изделия выберем множество допустимых альтернатив: A1 – 2, A2 – 5, A3 – 6, A4 – 8, A5 – 9, A6 – 10.

После определения множества допустимых решений путем экспертной оценки необходимо оценить эти решения для выбора оптимального.

Необходимо назначить прямым способом вес критерия, сумма критериев должна быть равна 1 (табл. 2).

Таблица 2

Вес критериев

Критерий		Вес
K1	Стоимость	0,3
K2	Длительность	0,1
K3	Риск	0,1
K4	Финансовая устойчивость	0,2
K5	Технологические ограничения	0,3

Экспертная оценка альтернатив по критериям за 2-й квартал по этапу изготовления опытного образца представлена в табл. 3.

Таблица 3

Экспертная оценка альтернатив

Альтернативы	Критерии				
	K1	K2	K3	K4	K5
A1	2	3	1	1	1
A2	5	2	1	5	6
A3	1	1	5	5	4
A4	3	1	4	8	4
A5	6	4	7	3	8
A6	4	6	1	4	6

Определение взвешенной оценки альтернатив представлено в табл. 4.

Таблица 4

Взвешенные оценки альтернатив

Альтернативы	Критерии					Взвешенные оценки альтернатив
	K1	K2	K3	K4	K5	
A1	0,6	0,3	0,1	0,2	0,3	1,5
A2	1,5	0,2	0,1	1	0,8	2,7
A3	0,3	0,1	0,5	1	1,2	2,2
A4	0,9	0,1	0,4	1,6	1,2	4,2
A5	1,8	0,4	0,7	0,6	2,4	5,9
A6	1,2	0,6	0,1	0,8	1,8	4,5

Получив взвешенную оценку альтернатив, можно найти

$$wl = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ijk} \rightarrow \max_{ij}$$

и выбрать оптимальный вариант. Из табл. 4 становится ясно, что оптимальным вариантом для изготовления ОО во 2-м квартале является А5 (Ввод сменного графика работы для увеличения рабочего времени), так как этот вариант имеет наиболее высокую взвешенную оценку.

Проведя расчеты аналогичным образом по каждому ключевому этапу и временному отрезку проекта, можно построить табл. 5.

Таблица 5

Оптимальные варианты управления

КПП	Период						
	2022		2023				2024
	1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.	5 кв.	6 кв.	7 кв.
1	2	3	4	5	6	7	8
Значение	Оптимальный вариант						
1. Опытный образец изделия	9	2	1	10	—	—	—
2. Протоколы испытаний	8	7	5	6	8	2	10

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
3. Квалификация кадров	1	13	–	–	–	–	–
4. Качество поставляемых комплектующих	4	11	3	–	–	–	–
5. Ритмичность поставок комплектующих	2	11	2	2	–	–	–
6. Договоры на поставку	7	11	10	–	–	–	–
7. Договоры с соисполнителями	11	7	10	–	–	–	–
8. Надежность оборудования	1	5	6	–	–	–	–
9. Технологическая готовность соисполнителей	11	1	1	8	–	–	–
10. Технологическая готовность головного исполнителя	1	8	8	–	–	–	–

На рис. 2 показаны результаты принятых управленческих решений, а на рис. 3 – достигнутые показатели.

Ключевые показатели проекта (шифр "ЛР-100")								
№ кпп	Ключевые показатели проекта	Значения КПП						
		2022		2023				2024
		1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.	5 кв.	6 кв.	7 кв.
k_1	Опытный образец изделия	0,00	0,20	0,30	0,50	0,60	0,80	1,00
k_2	Протоколы испытаний	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,80	1,00
k_3	Квалификация кадров	0,80	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
k_4	Качество поставляемых комплектующих	0,80	0,90	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
k_5	Ритмичность поставок комплектующих	0,00	0,00	0,60	0,80	1,00	1,00	1,00
k_6	Договоры на поставку	0,20	0,60	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
k_7	Договоры с соисполнителями	0,30	0,70	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
k_8	Надежность оборудования	0,90	0,90	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
k_9	Технологическая готовность соисполнителей	0,80	0,80	0,90	0,90	1,00	1,00	1,00
k_n	Технологическая готовность головного исполнителя	0,90	0,90	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
Плановые суммарные показатели		5,5	6,8	7,9	8,5	9,5	9,9	10,0
Суммарные значения показателей		4,7	5,9	7,3	8,2	9,2	9,6	10,0
Изготовление изделий								

Рис. 2. Результаты управленческих решений

Выводы

Выбор оптимального варианта управления позволил приблизить отстающие показатели к плановым значениям.

Само решение в результате применения изложенного материала определяется точкой B_{opt} за время t_k . Для достижения сформулированной цели – нахождения оптимального варианта управления проектом – может решаться задача определения пошагового управления, например задача динамического программирования [7].

Подтверждение оптимальности проекта обеспечивается оценкой эффективности полученного опытного образца.

Исходя из изложенного, с помощью итерационной процедуры построения управляющего воздействия, т.е. в результате работы построенного алгоритма, получаем конечное решение, обеспечивающее создание образца ВВСТ в соответствии с ТЗ.

Таким образом, представленный методический аппарат позволяет решить задачу управления проектом в заданные сроки.

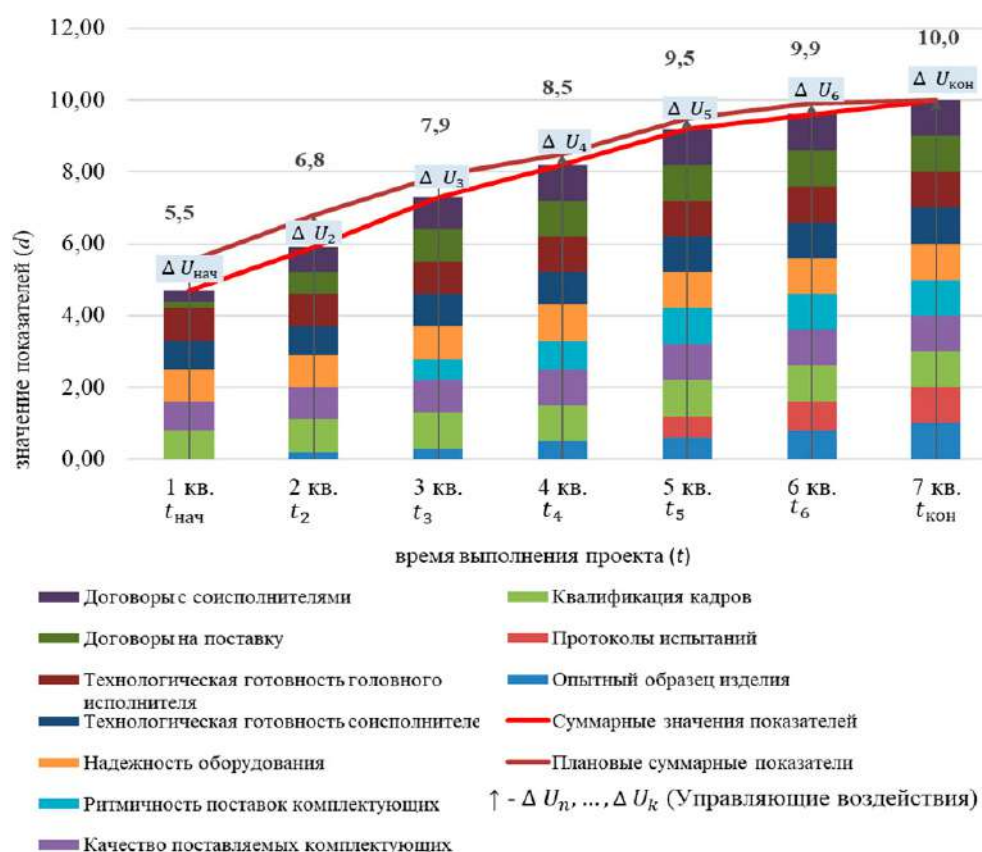


Рис. 3. Достигнутые показатели

Список литературы

1. Об утверждении Основ государственной политики в области развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации до 2025 года и дальнейшую перспективу : указ Президента Российской Федерации № 91 от 23.02.2017.
2. О перспективных направлениях развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации : постановление Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации № 476-СФ от 10.11.2021.
3. Воронин А. В., Ким Д. А., Кочетова К. С. Особенности оценки инвестиционных проектов, реализуемых предприятиями ОПК Государственной корпорации «Ростех» // Вооружение и экономика : сб. науч. ст. XIV Межведомств. науч.-теорет. конф. 2021. С. 677–688.
4. Батьковский М. А., Кураев Н. М., Стяжкин А. Н., Фомина А. В. Оценка производственно-технологического потенциала специального производства предприятий оборонно-промышленного комплекса // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 5. С. 113–125.
5. Андреев Г. И., Созинов П. А., Тихомиров В. А. Принципы принятия решений – основа критического исследования теории эффективности сложных технических систем : монография / под ред. П. А. Созинова. М. : Радиотехника, 2021.
6. Ногин В. Д. Сужение множества Парето: аксиоматический подход. М. : Физматлит, 2016. 249 с.
7. Демидов Б. А., Остапенко С. Н., Луханин М. И. [и др.]. Системно-концептуальные основы методологии военно-научных исследований и решения прикладных

- военно-технических проблем : монография : в 3 кн. / под ред. Б. А. Демидова. М. ; Тверь : ОПВЭиФ, 2014. Кн. 3.
8. Ушаков А. В., Вундер (Полинова) Н. А. Современная теория управления. Дополнительные главы : учеб. пособие для университетов / под ред. А. В. Ушакова. СПб. : Университет ИТМО, 2015 182 с.
 9. Brockmann E. N., Anthony W. P. Tacit knowledge and strategic decision making // Group & Organization Management. 2016. Vol. 27. P. 436–455.
 10. Faizi S., Rashid T., Saġabun W. [et al.]. Decision Making with Uncertainty Using Hesitant Fuzzy Sets // International Journal of Fuzzy Systems. 2018. Vol. 20. P. 93–193.
 11. Grekul V., Korovkina N., Korneva K. Decision making in ITSM processes risk assessment // Computer modelling new technologies. 2015. Vol. 19. P. 12–16.

References

1. *Ob utverzhdenii Osnov gosudarstvennoy politiki v oblasti razvitiya oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2025 goda i dal'neyshuyu perspektivu: ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii № 91 ot 23.02.2017 = On approval of the Fundamentals of State Policy in the Field of development of the Military-industrial complex of the Russian Federation until 2025 and beyond: Decree of the President of the Russian Federation No. 91 dated 02/23/2017.* (In Russ.)
2. *O perspektivnykh napravleniyakh razvitiya oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii: postanovlenie Soveta Federatsii Federal'nogo Sobraniya Rossiyskoy Federatsii № 476-SF ot 10.11.2021 = On promising areas of development of the Military-industrial complex of the Russian Federation: Resolution of the Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation No. 476-SF dated 11/10/2021.* (In Russ.)
3. Voronin A.V., Kim D.A., Kochetova K.S. Features of evaluation of investment projects implemented by defense industry enterprises of the Rostec State Corporation. *Vooruzhenie i ekonomika: sb. nauch. st. XIV Mezhdovedstv. nauch.-teoret. konf. = Armament and Economics : collection of scientific articles XIV Interdepartment. scientific theory. conference.* 2021. S. 677–688. (In Russ.)
4. Bat'kovskiy M.A., Kuraev N.M., Styazhkin A.N., Fomina A.V. Assessment of the production and technological potential of special production of enterprises of the military-industrial complex. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics.* 2016;(5):113–125. (In Russ.)
5. Andreev G.I., Sozinov P.A., Tikhomirov V.A. *Printsipy prinyatiya resheniy – osnova kriticheskogo issledovaniya teorii effektivnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem: monografiya = Principles of decision-making – the basis of a critical study of the theory of effectiveness of complex technical systems : monograph.* Moscow: Radiotekhnika, 2021. (In Russ.)
6. Nogin V.D. *Suzhenie mnozhestva Pareto: aksiomaticheskij podkhod = Narrowing the Pareto set: an axiomatic approach.* Moscow: Fizmatlit, 2016:249. (In Russ.)
7. Demidov B.A., Ostapenko S.N., Lukhanin M.I. et al. *Sistemno-kontseptual'nye osnovy metodologii voenno-nauchnykh issledovaniy i resheniya prikladnykh voenno-tekhnicheskikh problem: monografiya: v 3 kn. = System-conceptual foundations of the methodology of military scientific research and solutions to applied military-technical problems : monograph : in 3 books.* Moscow; Tver: OPVEiF, 2014;bk.3. (In Russ.)
8. Ushakov A.V., Vunder (Polinova) N.A. *Sovremennaya teoriya upravleniya. Dopolnitel'nye glavy: ucheb. posobie dlya universitetov = Modern theory of management. Additional chapters : studies. handbook for universities.* Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2015:182. (In Russ.)
9. Brockmann E.N., Anthony W.P. Tacit knowledge and strategic decision making. *Group & Organization Management.* 2016;27:436–455.

10. Faizi S., Rashid T., Saġabun W. et al. Decision Making with Uncertainty Using Hesitant Fuzzy Sets. *International Journal of Fuzzy Systems*. 2018;20:93–193.
11. Grekul V., Korovkina N., Korneva K. Decision making in ITSM processes risk assessment. *Computer modelling new technologies*. 2015;19:12–16.

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Дмитриевич Печалин

аспирант,
начальник корпоративного отдела,
Центральный научно-исследовательский
радиотехнический институт
им. академика А. И. Берга
(Россия, г. Москва,
ул. Новая Басманная, 20, стр. 9)
E-mail: npechalin@vk.com

Nikolay D. Pechalin

Postgraduate student,
head of the corporate department,
Central Scientific Research
Radio Engineering Institute
named after Academician A.I. Berg
(9 build., 20 Novaya Basmannaya street,
Moscow, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 05.08.2024

Поступила после рецензирования/Revised 28.11.2024

Принята к публикации/Accepted 17.12.2024